المملكـة العربيــة الســعودية

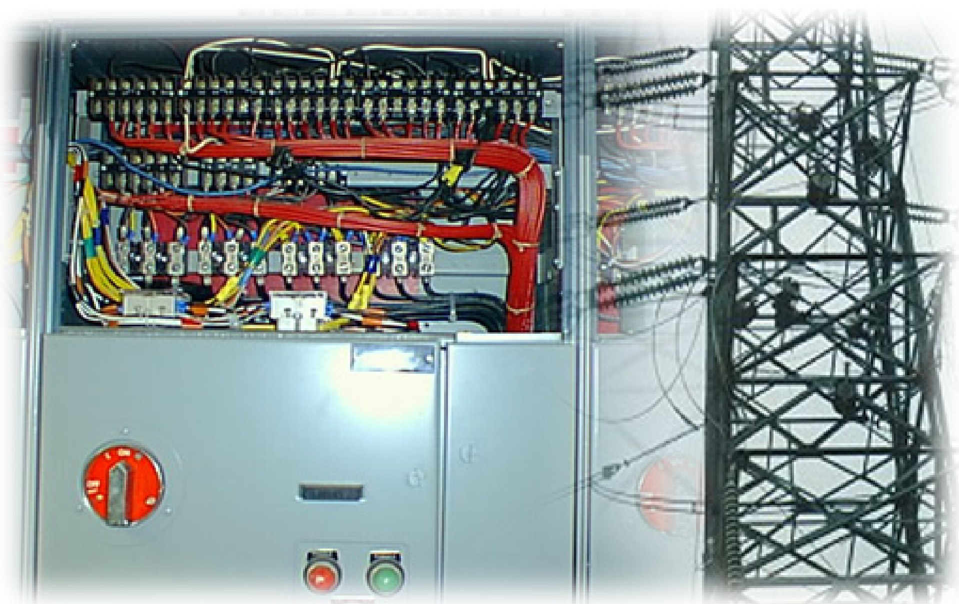
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

قوى كهربائية

شبكات كهربائية

٢٥٢ كهر



الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجةً للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي، لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " شبكات كهربائية " لمتدربي قسم" قوى كهربائية " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

شبكات كهربائية

عناصر منظومة القوى

عناصر منظومة القوى

١

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذا الفصل تكون:

١. تعرفت على عناصر منظومات القوى الكهربية

٢. ملما بوظيفة كل عنصر من العناصر

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب:

الوسائل المساعدة:

١. استخدم التعليمات في هذا القصل .

٢. صور فوتوغرافية ورسوم توضيحية لعناصر منظومة القوى

متطلبات الجدارة:

١. يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة.

الفصل الأول: عناصر منظومات القوى الكهربائيـــة

١ -١ مقدمة

لقد ارتبط التقدم الحضاري للبشرية منذ فجر التاريخ بمدى قدرة الإنسان على التحكم في الطاقة، فعندما كان الإنسان البدائي لا يملك سوى عضلاته فإنه أمضى حياته في الصيد وجمع ما يأكله أي ببساطة أمضى حياته يعمل للبقاء حيا، وككل الكائنات الحية استغل هذا الإنسان الطاقة الطبيعية استغلالا مباشرا فاستغل أشعة الشمس للإضاءة وأقصى ما وصل إليه هو استغلال عمليات تحويل الطاقة الطبيعية كاستغلال ضوء الشمس لتنمية المحاصيل. وقد دأب الإنسان بما حباه الله من عقل على إيجاد طرق لتحويل الطاقات الأولية إلى صورة مناسبة للاستغلال عندما يحتاجها وحيثما يريدها، وعندما استطاع الإنسان أن يتحكم في كميات كبيرة من الطاقة تمكن من التحليق في الجو وقطع المسافات الطوال في وقت لا يقارن بما كان يستغرقه لقطع نفس المسافة من قبل، بل واستطاع التجول في الفضاء والهبوط على سطح القمر، ولم تتطور قدرة الإنسان في الارتحال والتجوال فحسب ولكن في كل مناحي الحياة ولعلك أخي المتدرب مدرك تماما لما أحدثه تحكم الإنسان في الطاقة من تطور في إمكانيات البشر وزيادة في إنتاجيته في كافة المجالات وارتقاء في أسلوب معيشته. وتعد الطاقة الكهربية أكثر صور الطاقة قابلية للتحكم ولذلك فهي تعتبر أحد أهم عناصر التنمية الصناعية والتطور الشامل لأي دولة، ويعتبر مقدار ما يستهلكه الفرد من الطاقة الكهربية مؤشرا جيدا لمدى تقدم الدول، ويكمن سر تميز الطاقة الكهربية على سائر صور الطاقات الأخرى أنه يمكن توليدها بكميات كبيرة بطريقة اقتصادية في محطات توليد ذات قدرات عالية ونقلها بعد ذلك -بسهولة لا تدانيها فيها أي من صور الطاقات الأخرى - إلى أماكن الاستخدام، وبالإضافة إلى السهولة منقطعة النظير للتحكم فيها فإنه يسهل تحويلها إلى أي من الصور الأخرى فيسهل تحويلها إلى طاقة ضوئية للإنارة، وإلى طاقة حرارية للتدفئة والتسخين، كما يسهل تحويلها إلى طاقة ميكانيكية لاستخدامها في أغراض الجر الكهربي أولإدارة المحركات لكافة التطبيقات المختلفة. ولهذا شهدت صناعة توليد الكهرباء تطورا فاق في سرعة تطوره ونموه ماعداه من الصناعات الأخرى. فقد تطورت نظم إمداد الطاقة الكهربية من مجرد مولد يغذي مجموعة أحمال قريبة منه إلى أن أصبحت منظومات ضخمة تضم آلاف المولدات المترابطة معا وشبكات لنقل وتوزيع الطاقة تغطي مساحات جغرافية شاسعة.

وفي الوقت الحاضر تعتبر منظومة القوى الكهربية من أكبر النظم التي أنشأها الإنسان أن لم تكن أكبرها على الإطلاق من حيث عدد العناصر المكونة لها والانتشار الجغرافي الذي تغطيه وعدد

العاملين بها، وليس أدل على ذلك من نظرنا في بيانات الشركة السعودية الموحدة للكهرباء (سكيكو) والتي تتكون من خمسة أفرع تغطي كامل مساحة المملكة، وإذا أخذنا فرع المنطقة الوسطى على سبيل المثال لوجدناه يغطي مدينة ومنطقة الرياض ومنطقة القصيم ومنطقة الخرج ومنطقة الدوادمي، ويحتوي على ١٢ محطة توليد بقدرة إجمالية ٦٨٩٢ ميجاوات، وشبكة نقل يبلغ مجموع أطوال خطوطها ٥٨٤٩ كيلومتر بالإضافة إلى ١٥٦ محطة محولات وشبكة توزيع يبلغ مجموع أطوال خطوطها ٨٢٤٤٧ كيلومتر بالإضافة إلى ٧٣٣٧٤ محول، ويبلغ عدد العاملين بها ٧٩٤١ وعدد المستهلكين ١٢٤٢٧٦٦. ولك أن تتصور كم تبلغ ضخامة منظومة القوى للشركة ككل ويمكنك أن تزور موقع سكيكو على الإنترنت لتكتشف ذلك بنفسك.

١ -٢ مكونات منظومة القوي: نظرة شاملة

لعله من الواضح الآن أن منظومة القوى تشمل عددا هائلاً من العناصر المترابطة مع بعضها والتي تتكامل وظائفها لتحقيق الهدف الذي من أجله أنشئت المنظومة ألا وهو إنتاج الطاقة الكهربية وتوزيعها على المستهلكين لاستغلالها فيما يحتاجون إليه من أغراض. ويمكن بصفة عامة حصر عناصر منظومة القوى –كغيرها من النظم - في ثلاثة أصناف رئيسة هي:

أولا: المكونات المادية:

وتشمل جميع الآلات والمعدات والأجهزة المُعَدة لتوليد القدرة ونقلها وتوزيعها أو للتحكم في المتغيرات المختلفة داخل المنظومة ومراقبة أداء أجزاء المنظومة أو تلك التي تستخدم لحماية مكونات المنظومة من الأخطاء المختلفة وكذلك أجهزة القياس وأجهزة الاتصالات. ويمكن تصنيف هذه المكونات إلى:

دوائر القدرة: و هي التي تقوم بأداء الوظائف الأساسية لمنظومة القدرة من توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربية، وهذه الدوائر تشمل:

محطات التوليد	حيث يتم إنتاج الطاقة الكهربية
خطوط النقل والتوزيع	وتقوم بنقل الطاقة الكهربية من أماكن توليدها إلى أماكن استغلالها، وتوزيعها على المستهلكين

محطات المحولات	والتي تقوم برفع الجهد أو خفضه إلى المستوى المطلوب، ففي النقل يلزم أن يكون الجهد عاليا لتقليل الفقد في القدرة والهبوط في الجهد، في حين عند المستهلك يلزم أن يكون الجهد منخفضا لدواعي الأمن والسلامة، وفي التوزيع يكون الجهد متوسطا بين جهود النقل وجهد الاستغلال
الأحمال	وهي أماكن استهلاك الطاقة الكهربية في الأغراض المختلفة سواء كانت أحمال صناعية أو تجارية أو زراعية

وبالإضافة إلى دوائر القدرة توجد أيضا:

مكونات نظم الحماية	وهي الخاصة بحماية منظومة ضد أخطار تيارات القصر وتشمل المرحلات والقواطع و المصهرات ومحولات الجهد والتيار الخاصة بالحماية ومحولات التأريض
مكونات نظم التحكم	وهي المكونات الخاصة بالتحكم في تشغيل منظومة القوى للحصول على مستويات الأداء المطلوبة، وتشمل محولات تنظيم الجهد ومكثفات تحسين معامل القدرة وأجهزة التحكم في سريان القدرة وغيرها
أجهزة القياس	وتشمل أجهزة قياس التيار والجهد والقدرة وعدادات الطاقة اللازمة لمراقبة أداء المنظومة
دوائر الاتصالات	وهي التي تقوم بنقل البيانات من كافة أجزاء المنظومة إلى مركز التحكم ونقل أوامر التشغيل من مركز التحكم إلى المحطات المختلفة، ولأهمية الاتصالات في تشغيل منظومة القوى فلا بد من توفير قنوات اتصال آمنة بين أجزاء منظومة القوى بطرق مختلفة، عن طريق خطوط الهاتف المؤجرة، أوعن طريق تحميل موجات الاتصالات على خطوط النقل الكهربائية، أو استخدام موجات الراديو، أو عن طريق تركيب خطوط خاصة للاتصال

ثانيا: المكونات المعنوية:

وتشمل حزم البرمجيات التي تستخدم في إجراء الحسابات اللازمة لإتمام الوظائف المختلفة، حيث إن جميع عمليات التشغيل والتحكم في منظومة القوى.تتم باستخدام الحاسب الآلي، فتوجد برمجيات وأنظمة حاسب للتنبؤ بالأحمال ولتحديد المحطات التي ستقوم بتغذية هذه الأحمال وتقسيم الأحمال على المولدات بطريقة اقتصادية، وكذلك لحساب سريان الأحمال ولتحديد حالة منظومة القوى ولإجراء حسابات تيارات القصر. وتشمل أيضا مجموعة التنظيمات واللوائح التي تنظم العمل وتحدد الحقوق والواجبات داخل المنظومة وكذلك القواعد والإجراءات المتبعة في تشغيل وصيانة المنظومة وأيضا قواعد الأمن والسلامة.

ثالثا :العنصر البشري:

وهو من أهم العناصر في أي نظام، وفي منظومة القوى يمثل العنصر البشري أهمية قصوى حيث إن التشغيل الآمن السليم لمنظومة القوى يستلزم توافر العناصر البشرية المؤهلة للاضطلاع بالمهام المختلفة داخل المنظومة. والعنصر البشري يشمل جميع العاملين بمنظومة القوى في كل المستويات سواء في المستويات القيادية المسؤولة عن التخطيط والإدارة أو التنفيذية المسئولة عن تشغيل المنظومة والتحكم فيها ووقايتها وصيانتها والمدربين والمتدربين أيضا، وأنت أخي المتدرب تدخل ضمن هذا العنصر كونك دارساً لتقنية الكهرباء لتصبح في المستقبل القريب أحد العاملين بها إن شاء الله.

وجل اهتمامنا في هذا الباب سيكون على العناصر المادية المكونة لمنظومة القوى وخصوصا دوائر القدرة حيث يتم دراسة أجهزة القياس في مقرري دوائر وقياسات -١ ودوائر وقياسات -٢، وأجهزة التحكم في مقرر التحكم والصيانة في نظم القوى ونظم الوقاية في مقرر حماية النظم الكهربية. كما أننا لن نتعرض لدراسة أداء عناصر منظومة القوى حيث إنه يتم دراسة أداء الآلات الكهربية والمحولات في مقررات الآلات الكهربية ودراسة أداء خطوط النقل في مقرر محطات توليد ونقل القدرة ويتم دراسة نظم التوزيع الكهربي في مقرر مستقل يحمل نفس الاسم.

وبصفة عامة يمكن تقسيم منظومة القوى كما هو موضح بشكل ١ -١. إلى:

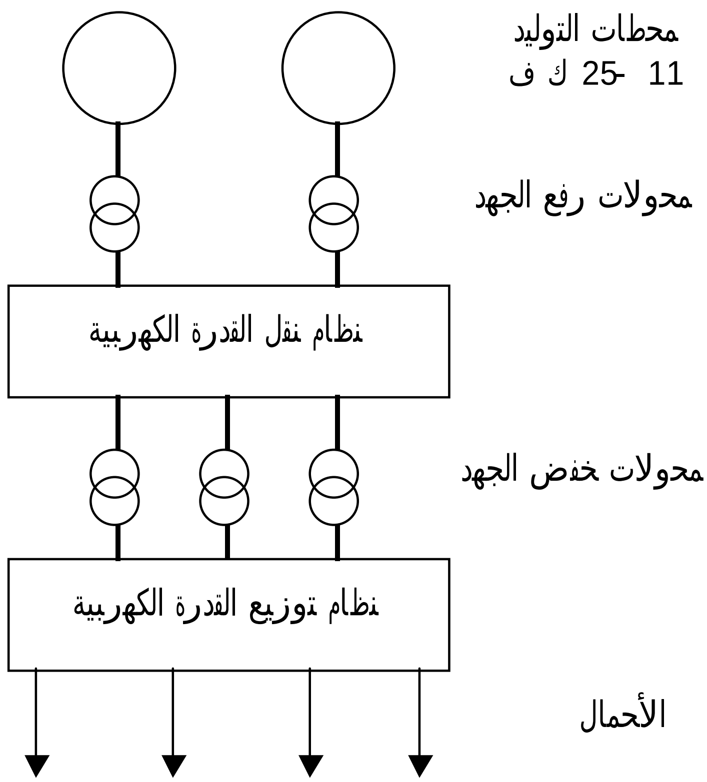
١. محطات التوليد:

حيث يتم توليد الطاقة الكهربية عن طريق تحويل إحدى صور الطاقة الأولية إلى طاقة كهربية، ويتم ذلك عند جهود لا تتعدى ٢٥ ك ف لأسباب تقنية تتعلق بإمكانية عزل الموصلات داخل المولدات.

وتحتوي محطة التوليد بصفة أساسية على محرك أولي يقوم بتحويل الطاقة الأولية إلى طاقة حركية ومولد كهربي يقوم بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربية.

٢. محولات رفع الجهد:

وهذه المحولات تقوم برفع الجهد من مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل، وتوجد هذه المحولات في محطات محولات النقل Transmission substation التي تكون قريبة من محطات التوليد.



شكل ١ -١ المكونات الرئيسية لمنظومة القوى

٣. نظام نقل القدرة الكهربية:

وهو المسؤول عن نقل القدرة الكهربية لمسافات طويلة من محطات التوليد إلى مراكز الأحمال والمكون الأساسي لنظام نقل القدرة هو خط النقل الكهربي والذي يكون في الغالب خط نقل هوائي إلا إذا دعت الحاجة إلى استخدام الكابلات الأرضية. وعادة ما يبدأ خط النقل من محطة محولات قريبة من محطة التوليد تقوم برفع الجهد من مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل، وينتهي خط النقل

خارج المدن والتجمعات السكنية في محطة محولات تقوم بتخفيض الجهد إلى مستوى أقل مناسب للتوزيع داخل المدن، ويتم نقل القدرة الكهربية على جهود مرتفعة (١٣٢، ٢٣٠، ٣٨٠ ك ف)،

٤. محولات خفض الجهد:

تقوم بتخفيض الجهد من جهد النقل إلى مستوى جهود التوزيع والتي تتراوح من ١٣,٨ حتى ٣٣ ك ف

٥. شبكات توزيع القدرة الكهربية:

وهي التي تقوم بتوزيع الطاقة الكهربية على المشتركين وتنتهي بمحولات توزيع تخفض الجهد إلى ٢٢٠ ف أو ١١٠ ف

وفيما يلي سنتعرف على هذه المكونات،

١-٣. **محطات التوليد** Generating Stations

محطة التوليد هي الجزء المسؤول عن إنتاج الطاقة الكهربية في منظومة القوى ويعتبر المولد الكهربي هو العنصر الرئيسي في محطة التوليد، والمولد Generator هو مصدر الطاقة الكهربية في منظومة القوى حيث يقوم بتحويل الطاقة الحركية الدورانية إلى طاقة كهربية، ويحصل المولد على الطاقة الحركية الدورانية من محرك أولي prime mover يحول إحدى صور الطاقة الأولية إلى طاقة حركية، والمحرك الأولى قد يكون إما توربيناً بخارياً أو توربيناً غازياً أو توربيناً هيدروليكياً. وإلى جانب المولد والمحرك الأولي تحتوي محطة التوليد على مجموعة الدوائر التالية:

- دوائر القدرة الرئيسية وهي التي تقوم بنقل القدرة من المولدات إلى محولات رفع الجهد
- دوائر القدرة المساعدة وهي التي تقوم بتغذية القدرة إلى جميع المساعدات الموجودة بالمحطة
- دوائر التحكم في القواطع وجميع الأجهزة التي يتم تشغيلها من غرفة التحكم بالمحطة
- دوائر الإنارة لإضاءة المحطة ولإمداد القدرة لأجهزة الخدمة والصيانة المتنقلة
- دوائر تغذية أقطاب المولدات، وهذه الدوائر يتم تركيبها بحيث تتوافر لها درجات عالية من الحماية الكهربائية و الحماية ضد الأخطار الطبيعية وذلك لأنه بدون توافر تغذية لملفات أقطاب المولد لا يمكنه إنتاج القدرة الكهربائية

- دوائر الأجهزة والمرحلات التي تقوم بإمداد نظام الحماية بقيم كل من الجهد والتيار والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة ودرجات الحرارة والضغوط ومعدلات السريان ، .... الخ ، وذلك لحماية المولدات والتوربينات
- دوائر الاتصالات داخل المحطة وكذلك الاتصالات بباقي أجزاء المنظومة من محطات أخرى ومراكز تحكم وهذه الدوائر تشمل دوائر الهاتف واللاسلكي ودوائر الاتصالات باستخدام موجات الراديو الدقيقة (الميكروويف) وكذلك دوائر الاتصالات المحملة على خطوط نقل القدرة (Transmission-line carrier)

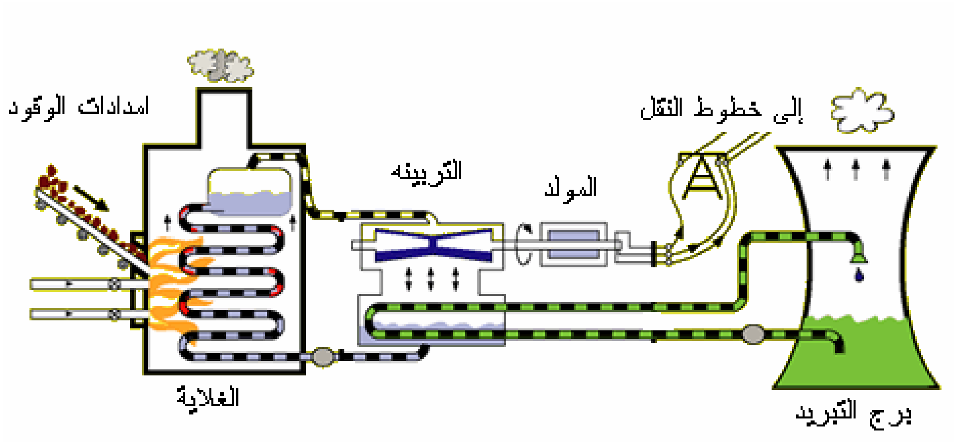
وما يحدث في محطة التوليد ليس إنتاجا للطاقة الكهربية من العدم – فالطاقة لا تفنى ولا تستحدث إلا بإذن الله تعالى - ولكن ما يحدث هو تحويل إحدى صور الطاقة الأولية إلى طاقة كهربية وقد يستلزم الأمر تحويل الطاقة إلى عدة صور قبل الوصول إلى الصورة الكهربية ، ونحن وإن كان اهتمامنا الأكبر بالجانب الكهربي فإننا سنعطي فكرة مبسطة عن أنواع محطات التوليد المختلفة وكيفية توليد الكهرباء بها دون خوض في تفاصيل الجانب الميكانيكي حيث إنك أخي المتدرب ستدرسه بالتفصيل في مقرر محطات التوليد ونقل القدرة.
وأهم أنواع محطات التوليد والتي تستخدم لتوليد كميات كبيرة من الطاقة هي:

١ -٣ -١ المحطات الحرارية Thermal Power Stations

وهى المحطات التي تعتمد في تشغيلها على حرق الوقود (الفحم – الزيت الخام - المازوت – الديزل – الغاز الطبيعي) ويمكن تقسيمها إلى:

المحطات البخارية Steam power stations

حيث تستغل الطاقة الحرارية الناتجة عن حرق الوقود في تسخين الماء وإنتاج بخار عند ضغط مرتفع ودرجة حرارة عالية ثم يستغل هذا البخار في إدارة توربين بخاري بسرعة عالية قد تصل إلى ٣٦٠٠ لفة في الدقيقة والتي بدورها تقوم بإدارة المولد لإنتاج الكهرباء، و شكل ١ -٢ يوضح أهم مكونات المحطة البخارية.



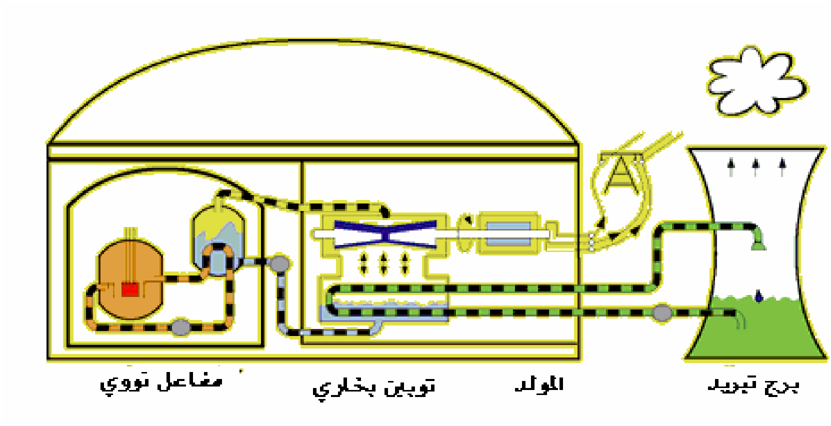
شكل ١ -٢ مكونات المحطة البخارية

المحطات الغازية Gas power stations

وفيها يتم حرق الغاز الطبيعي واستخدام نواتج الاحتراق في إدارة توربين غازي والتي بدورها تقوم بإمداد المولد بالطاقة الميكانيكية اللازمة. ولأن عادم هذه المحطات يكون غازات ذات درجة حرارة عالية فإنه يتم الآن الاستفادة من هذا العادم في إنتاج البخار اللازم لتشغيل توربين بخاري وذلك لرفع كفاءة تحويل طاقة الغاز إلى طاقة كهربائية وتعرف مثل هذه المحطات بالمحطات ذات الدورة المركبة.

المحطات النووية Nuclear power stations

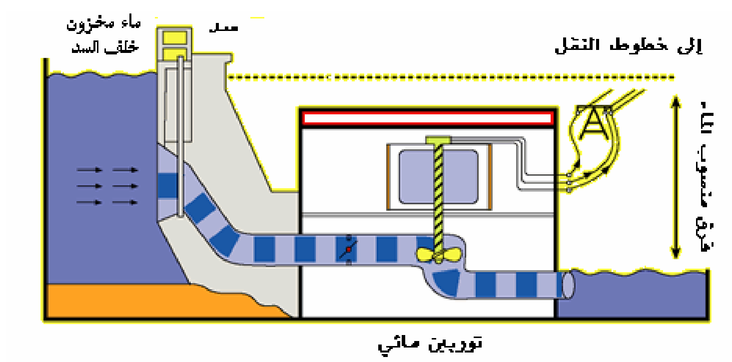
والمحطات النووية هي محطات بخارية ولكن تختلف عن المحطة البخارية العادية في طريقة إنتاج البخار فحين يتم إنتاج البخار في المحطة البخارية التقليدية عن طريق حرق الوقود فإن البخار المتولد في المحطات النووية يكون نتيجة إمرار الماء على قلب المفاعل النووي لتبريده، وفي داخل المفاعل النووي يستخدم وقود نووي –اليورانيوم المخصب - وتتم سلسلة من الانشطارات النووية ينشأ عنها حرارة شديدة تقوم بتبخير ماء التبريد والذي يستغل في إدارة توربين بخاري. شكل ١ -٣ يوضح أهم مكونات محطة الطاقة النووية.



شكل ١ -٣ مكونات المحطة النووية

١ -٣ -٢ المحطات الهيدروليكية Hydraulic power stations

وفيها تستغل طاقة الماء المندفع من الشلالات أو من خلف السدود لإدارة توربين مائي يقوم بإدارة المولد كما هو موضح بشكل ١ -٤



شكل ١ -٤ مكونات المحطة الهيدروليكية

وبالطبع هناك أنواع عديدة أخرى لمحطات التوليد كمحطات الديزل والتي يوجد العديد منها بالمملكة، ومحطات التوليد التي تستغل الطاقات غير التقليدية كطاقة الشمس وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر بالبخار والمحيطات ولكن هذه المحطات لا تنتج كميات كبيرة من الطاقة الكهربية كالمحطات التي ذكرناها سابقا.

وكما سبق أن ذكرنا أن اهتمامنا في هذا المقرر ينصب على العناصر الكهربية لمنظومة القوى وبمراجعة أنواع المحطات التي ذكرناها سابقا تجد أن العامل المشترك في هذه المحطات هو المولد الكهربي وهو ما سنتناوله ببعض التفصيل.

١ -٣ -٣ المولد الكهربي

هو العنصر الأساسي في محطة التوليد وهو الذي ينتج الطاقة الكهربية، والمولدات الكهربية المستخدمة في منظومة القوى كلها من نوع الآلات المتزامنة synchronous machines والتي تدار بسرعة ثابتة تسمى سرعة التزامن synchronous speed وتقوم بتوليد الطاقة الكهربية في صورة تيار متردد ثلاثي الأوجه Three phase alternating current عند جهد ثابت وتردد ثابت، وجميع المولدات الموجودة في منظومة القوى تعمل عند نفس التردد حيث إنه يتم ربطها جميعا معا لأغراض التشغيل الاقتصادي وتقاسم الأحمال بطريقة تقلل من تكاليف التشغيل وتضمن استمرارية تغذية الأحمال. ومع هذا فقد يختلف جهد المولدات من محطة توليد إلى أخرى حيث تقوم المحولات برفع جهود التوليد إلى نفس القيمة وهي قيمة جهد النقل.

ويتركب المولد من عضو ثابت مكون من شرائح صلب سليكوني ومشَكَّل به مجاراً لحمل ملفات إنتاج القدرة وعضو دوار يحمل الأقطاب المغناطيسية التي تنشئ المجال المغناطيسي اللازم لتوليد القدرة الكهربية. شكل ١ -٥ يوضح العضو الثابت لمولد.



شكل ١ -٥ العضو الثابت لمولد

وجدير بالذكر أن العضو الثابت يكون هو نفسه لجميع المولدات فيما عدا اختلاف الأبعاد من مولد لآخر، أما العضو الدوار فيختلف في المولدات ذات السرعات العالية كتلك التي تستخدم مع التوربينات البخارية عنه في المولدات ذات السرعات البطيئة والتي تستخدم مع التوربينات الهيدروليكية

أو التوربينات التي تقل سرعتها عن ١٠٠٠ لفة في الدقيقة أيا كان نوعها. وينشأ الاختلاف من أن المولد الذي يعمل عند سرعة عالية يكون عدد أقطابه أقل من المولد الذي يعمل عند سرعة منخفضة، وهذا الاختلاف ينعكس على شكل المولد فتجد المولد الذي يعمل على توربين بخاري يكون ذا قطر أقل وطول محوري أكبر حيث إن عدد أقطابه قليل ويستخدم ما يسمى بالعضو الدائر الأسطواني، ويكون القطر صغيرا لتقليل عزم القصور الذاتي للأجزاء الدوارة حيث إنها تدور بسرعة عالية، وعلى الجانب الآخر تجد المولد الذي يعمل عند سرعة بطيئة –كذلك الذي يستخدم في المحطات الهيدروليكية - ذا قطر كبير حتى يمكن وضع العدد الكبير من الأقطاب والذي قد يصل إلى أكثر من ٤٨ قطب من نوع الأقطاب البارزة مشابهة لأقطاب آلة التيار المستمر.

ويلزم تغذية الأقطاب بتيار مستمر، والجزء الذي يقوم بهذه المهمة يسمى مغذي الأقطاب exciter، وقد يكون إما مولد تيار مستمر مثبت على نفس عمود الإدارة مع المولد الرئيسي ومتصل بملفات المجال للمولد الرئيسي عن طريق حلقات انزلاق، وقد يكون مولد تيار متغير متصل بقنطرة توحيد مثبتة على نفس عمود الإدارة مع المولد ومتصلة اتصالا مباشرا مع الأقطاب دون الحاجة إلى حلقات انزلاق.

و يزود المولد بمنظم جهد أوتوماتيكي وظيفته التحكم في تيار المجال للمحافظة على جهد المولد ثابتا مع تغير ظروف التحميل، حيث يقوم منظم الجهد بزيادة تيار المجال في حالة انخفاض جهد المولد حتى يعيده إلى القيمة المطلوبة، ويقوم بتخفيض تيار المجال في حالة زيادة جهد المولد حتى يعود الجهد إلى القيمة المطلوب ثباته عندها. ويتم إبقاء سرعة المولد ثابتة عند سرعة التزامن حتى يظل التردد ثابتا ومساويا لتردد الشبكة وذلك عن طريق تزويد التوربين بحاكم للسرعة وظيفته التحكم في الطاقة الداخلة للتوربين –بالتحكم في كمية البخار للتوربين البخاري أو كمية الماء للتوربين الهيدروليكي - لتثبيت سرعتها.

تتراوح جهود التوليد من ٣,٣ ك ف حتى ٢٥ ك ف ولا يمكن التوليد عند جهود أعلى من ذلك لصعوبة عزل الملفات داخل مجارى العضو الثابت للمولد بطريقة تسمح لها بتحمل جهود أعلى من ذلك. وقدرة المولد قد تصل إلى ١٣٠٠ ميجاوات ومعنى هذا أنه لهذه القدرات الكبيرة عند الجهود المنخفضة نسبيا سيكون التيار كبير جدا بطريقة يصعب معها نقل القدرة عند هذه الجهود المنخفضة لما سوف يسببه هذا التيار الكبيراً من فقد في القدرة وانخفاض في الجهد أثناء النقل. وأيضا لأن الجهد هو الضغط الذي يسبب سريان الطاقة الكهربية فإذا أردنا نقل كميات كبيرة من القدرة لمسافات كبيرة كان

لزاما رفع الجهد إلى مستوى أعلى بكثير من جهد التوليد ولهذا فإن العنصر التالي لمحطة التوليد هو محطة محولات النقل والتي تشمل محولات رفع الجهد إلى مستوى جهد النقل.

١ -٤ محطات محولات رفع وخفض الجهد

وظيفة هذه المحطات هي رفع الجهد أو خفضه إلى المستوى المطلوب في كل جزء من أجزاء المنظومة، فتقوم برفع الجهد من مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل في بداية خط النقل وكذلك تقوم بتخفيض الجهد على مراحل من مستوى جهد النقل إلى مستوى جهد التوزيع.

والعنصر الرئيسي في هذه المحطات هو محول القدرة الذي يقوم بالوظيفة الرئيسية للمحطة، وإلى جانب احتواء محول القدرة فإن المحطة تقوم بالوظائف الآتية:

- تشغيل قواطع التيار في حالة حدوث خطأ في خط النقل أو في المحطة ذاتها
- التحكم في سريان القدرة إلى منطقة معينة
- احتواء أجهزة الحماية ومحولات الجهد والتيار الخاصة بالحماية وبأجهزة القياسات
- تحتوي أيضا على تجهيزات ومعدات فصل وتوصيل تسمح بإجراء الصيانة لأي معدة من معدات المحطة دون قطع الخدمة عن أي منطقة تخدمها هذه المحطة

ويمكن تقسيم هذه المحطات إلى نوعين

١ -٤ -١ محطات محولات التوزيع Distribution substation

محطات محولات التوزيع هي محطات خفض للجهد فقط حيث تقوم هذه المحطات بخفض الجهد من مستوى النقل الفرعي إلى مستوى جهد التوزيع الأولي (١٣,٨ ك ف في المملكة) لتغذية شبكة التوزيع التي تقوم بتوزيع القدرة الكهربية على محولات التوزيع (التي تراها منتشرة في الشوارع محمولة على أعمدة خشبية أو موضوعة داخل أكشاك).

محول القدرة

محولات القدرة هي ليست النوع الوحيد من المحولات الموجود بمحطة التوزيع حيث توجد أنواع عديدة من المحولات كمحولات الجهد والتيار لأغراض الحماية والقياس وكذلك محولات تنظيم الجهد ومحولات التحكم في سريان القدرة، ولكن كل هذه الأنواع من المحولات تكون ذات قدرات صغيرة وإمكانيات تحميل لفترات زمنية قصيرة لا تزيد في بعض أنواع المحولات عن خمس دقائق وجميع هذه الأنواع ليس لها أي دور في عملية تخفيض الجهد أو رفعه اللهم إلا أداء بعض الوظائف المساعدة التي تساعد في مراقبة وحماية محول القدرة الرئيسي والدوائر المتصلة به، أما محول القدرة فهو الذي تعبر من

خلاله كميات القدرة الكبيرة لتحويلها من مستوى جهد إلى مستوى آخر. وعلى ذلك نتوقع أن يكون محول القدرة أكبر مكونات محطة محولات التوزيع حجما.

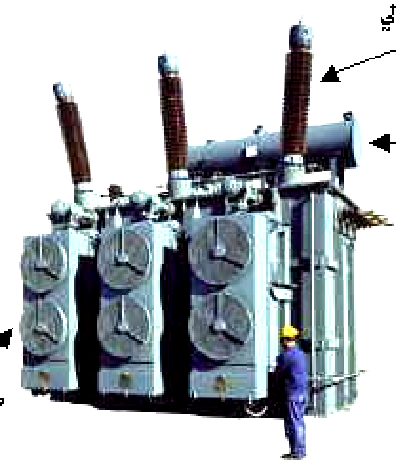
ويتكون محول القدرة من

- القلب الحديدي ويصنع من شرائح الصلب السيليكوني والذي يتمتع بسماحية مغناطيسية عالية وفقد قليل في القدرة
- الملفات و غالب المحولات لها ملفين لكل وجه ولكن في بعض أنواع المحولات يمكن أن يكون هناك أكثر من ملف ان لأغراض التحكم أو التأريض، شكل ١ -٦ يبين صورة لملفات محول ثلاثي الأوجه موضوعة حول القلب الحديدي ويبين كذلك التوصيلات الخارجية.



شكل ١-٦ القلب الحديدي والملفات والأطراف الخارجية لمحول قدرة

وعادة ما تكون محولات القدرة من النوع المغمور في الزيت، ويستغل الزيت هنا لسببين أولهما هو عزل المحول وملفاته والقلب الحديدي له عن جسم المحول وثانيهما المساعدة في تبريد المحول عن طريق حمل الحرارة بعيدا عن الملفات والقلب وطردها إلى الهواء الجوي عن طريق جسم المحول وما به من زعانف معدة لزيادة السطح المعدني المعرض للهواء الجوي.



شكل ١ -٧ محول قدرة

و تبريد المحول له من أهمية قصوى حيث إن أداء المحول يعتمد بدرجة كبيرة جدا على مقدرته على تبديد الحرارة الناشئة عن المفاقيد ، و يمكن تصنيف نظم التبريد في محولات القدرة المغمورة في الزيت إلى:

- ONAN : اختصارا لعبارة Oil Natural Air Natural أي أن الهواء يتحرك بطريقة طبيعية وكذلك الزيت يتحرك فقط بتأثير تيارات الحمل الطبيعية.
- ONAF : اختصارا لعبارة Oil Natural Air Forced أي تدوير قسري للهواء باستخدام المراوح في حين أن الزيت يتحرك فقط بتأثير تيارات الحمل الطبيعية.
- OFAF : اختصارا لعبارة Oil Forced Air Forced أي يتم عمل دفع الهواء بمروحة والزيت بمضخة لزيادة حركة كل منهما
- OFWF : تدوير قسري للزيت والماء، حيث يتم تبريد الزيت بالماء عن طرية مبادلات حرارية

شكل ١ -٧ يبين محول قدرة ١٥ ميجا فولت أمبير ١٠٥/١ ك ف ونظام التبريد لهذا المحول هو OFAF.

١ -٤ -٢ محطات محولات النقل Transmission substation

وتوجد هذه المحطات في بداية خط النقل ونهايته، وتتميز بأنها تتعامل مع قدرات أعلى بكثير من محطات محولات التوزيع حيث قد تصل قدرة المحول في هذه المحطة ١٠٠٠ ميجا فولت أمبير ولذلك يطلق عليها محطة محولات القدرات العالية Bulk power substation ، وتوجد محطة لرفع الجهد في بداية الخط وأخرى لخفض الجهد في نهايته. وبالإضافة إلى ذلك تقوم هذه المحطة بالوظائف الآتية:

وعموما تقوم هذه المحطة بجميع المهام التى تقوم بها محطة التوزيع ولكن عند مستويات جهود أعلى وقدرات أكبر بكثير.

معظم العناصر الموجودة بهذه المحطة هى نفسها الموجودة بمحطة التوزيع ولكن بأحجام أكبر وقدرات أعلى ولذلك سنؤجل الحديث عن هذه التفاصيل لحين الحديث عن محطات التوزيع وسنتحدث هنا عن الاختلافات بين هذه المحطة ومحطة التوزيع، وأهم هذه الاختلافات:

١. المسافات بين المعدات أكبر وذلك بدهي لأن مستوى الجهود أعلى (حتى ٣٨٠ ك ف في المملكة في حين أن جهود التوزيع لا تتعدى ٣٣ ك ف)

٢. محطة محولات النقل تستخدم المحولات الذاتية auto transformers طبعا ليس هو النوع الوحيد المستخدم في محطات محولات النقل ولا حتى الأكثر استعمالا ولكنه يستعمل وليس هناك سبب يحول دون استخدامه في هذه المحطات أما محطات محولات التوزيع فلا تستخدم هذا النوع من المحولات. والسبب في ذلك كون ملف الجهد العالي وملف الجهد المنخفض متصلين معا ويشتركان في توصيلة نقطة التعادل فإذا حدث فصل لتوصيلة نقطة التعادل لأي سبب ظهر الجهد العالي كله على أطراف الجهد المنخفض ولك أن تتخيل مدى ما يحدث من دمار في أجهزة مصممة للعمل على ١١٠ فولت عندما تتعرض لجهد مقداره ١٣٨٠٠ فولت ولذلك لا يستخدم المحول الذاتي كمحول توزيع نهائيا. ولكن في محطات محولات النقل حيث يتم تحويل الجهود من مستوى جهد عالٍ إلى مستوى جهد عالٍ آخر أو مستوى جهد النقل إلى مستوى الجهد المتوسط وحيث لايتم الوصول إلى هذه المحطات أو التعامل معها إلا من قبل عمالة فنية مدربة تدريبا عاليا فإن المحولات الذاتية تستخدم بكثرة.

وعموما فإن أول محول بعد المولد يكون دائما محولاً ذا ملفين وذلك لعزل الجهود المستمرة التي قد تنشأ في خط النقل نتيجة أي حالة عابرة أو أثناء عمليات الفصل والتوصيل وكذلك آخر محول ناحية المشترك يكون دائما محولاً ذا ملفين لأغراض الأمن والسلامة.

وميزة استخدام المحول الذاتي أنه أقل في الكلفة وأصغر في الحجم ومتطلبات التبريد أقل عنها في حالة المحول ذي الملفين، ويعيب المحول الذاتي صغر معاوقته مقارنة بالمحول ذي الملفين مما يتسبب في أن تكون تيارات القصر أكبر.

٣. محولات التأريض Earthing transformers

معظم نظم النقل والنقل الفرعي تكون مؤرضة تأريضاً صلباً solid earthing أي بتوصيل نقطة التعادل مباشرة بالأرض وذلك لكي تكون تيارات الخطا كبيرة فتميزها أجهزة الحماية وخصوصا في حالات الأخطاء المتصلة بالأرض وكذلك لتقليل الإجهاد الكهربي على العوازل والمعدات. وتكون المحولات في

محطات محولات النقل عادة متصلة بطريقة نجمة مؤرضة في حين أن نظم النقل الفرعية تكون عادة متصلة دلتا لرفع معاوقة التتابع الصفري في حالة الأخطاء الأرضية. ويتم تأريض مثل هذه النظم باستخدام محولات التأريض earthing transformers. ووظيفة هذه المحولات هو الحد من تيارات القصر الأرضية إلى قيمة التيار المقنن لخط التعادل وتستخدم للتأريض فقط أي لا يتم تحميلها بأي أحمال ولذلك فهي صغيرة الحجم. ويتم تحديد مقننات هذه المحولات لتتحمل مرور التيار بها لمدة لا تزيد على خمس دقائق حيث يجب أن تعمل أجهزة الحماية قبل ذلك بكثير ويتم توصيل هذه المحولات بأرضي المحطة.

١ -٥ نظام نقل القدرة الكهربية:

وهو المسؤول عن نقل القدرة الكهربية لمسافات طويلة من محطات التوليد إلى مراكز الأحمال والمكون الأساسي لنظام نقل القدرة هو خط النقل الكهربي والذي يكون في الغالب خط نقل هوائي إلا إذا دعت الحاجة إلى استخدام الكابلات الأرضية. واستخدام الخطوط الهوائية بصورة أكبر من الكابلات يأتي لأسباب عديدة منها وأهمها هي التكلفة الأقل بكثير من تكلفة الكابل الذي ينقل نفس كمية القدرة لنفس المسافة وكذلك لسهولة صيانة الخطوط الهوائية واكتشاف الأعطال وإصلاحها.

وعادة ما يبدأ خط النقل من محطة محولات قريبة من محطة التوليد تقوم برفع الجهد من مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل، وينتهي خط النقل خارج المدن والتجمعات السكنية في محطة محولات تقوم بتخفيض الجهد إلى مستوى أقل مناسب للتوزيع داخل المدن، ويتم نقل القدرة الكهربية على جهود مرتفعة (١٣٢، ٢٣٠، ٣٨٠ ك ف)،

وتتكون خطوط النقل في حالة التيار المتردد من دائرة مفردة ثلاثية الوجه single circuit three phase أو دائرة مزدوجة ثلاثية الوجه Double circuit three phase. ونظرا لاتساع رقعة المملكة ووجود عدد من المدن والقرى على مسافات متفاوتة فقد تم إنشاء شبكات نقل ذات جهود عالية وفائقة لنقل الطاقة من أماكن توليدها إلى مسافات بعيدة حيث توجد أماكن الاستهلاك .

وتصنع موصلات خط النقل عادة من النحاس أو الألومنيوم أو الألومنيوم المقوى بالصلب ، كما تحمل هذه الموصلات على أبراج من الصلب أو الخرسانة أو الخشب على حسب الجهد المنقول عليها ، أيضا يتم استخدام عوازل كهربائية لعزل هذه الموصلات عن الأبراج ، وتزداد القدرة المنقولة عبر الخط بزيادة الجهد الذي يعمل عنده الخط

١ -٦ شبكات توزيع القدرة الكهربية :

وهي التي تقوم بتوزيع الطاقة الكهربية على المشتركين وتتكون من مجموعة مغذيات تبدأ من محطة محولات رئيسية وتنتهي بمحولات توزيع تخفض الجهد إلى ٢٢٠ ف أو ١١٠ ف، و مهمة منظومات التوزيع هي استقبال القدرة الكهربائية المرسلة من محطات التوليد عبر خطوط النقل وتوزيعها على المستهلكين باختلاف أنواعهم على جهود تتناسب مع أغراض الاستهلاك ، ويتم ذلك من خلال محطات تحويل فرعية substations لتحويل الجهود الفائقة (EHV) أو العالية (HV) إلى جهود متوسطة (MV) أو جهود منخفضة (LV) . وتستخدم كل من الموزعات الهوائية والكابلات الأرضية في منظومات التوزيع، وعلى الرغم من أن التوزيع باستخدام الكابلات الأرضية يتكلف أضعاف ما يتكلفه التوزيع باستخدام الموزعات الهوائية ، إلا أن استخدام الكابلات الأرضية يعد ضرورة حتمية في حالة التوزيع في المناطق السكنية .

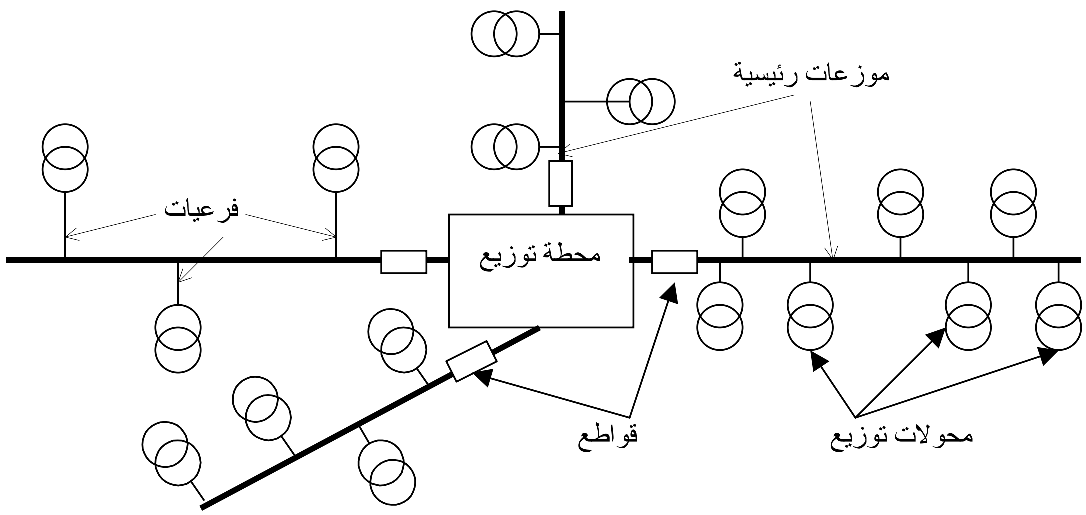
كما يتم التوزيع عادة على مرحلتين : التوزيع الأولي (الابتدائي) Primary distribution على جهود تتراوح بين KV ٦,٦ – KV ٣٣ حسب الجهود القياسية المستخدمة في المنطقة ، ثم التوزيع الثانوي (المنخفض) Secondary distribution على جهود الاستخدام حيث يوجد نظامين ٢٢٠/١١٠ V. أو V. ٣٨٠/٢٢٠ .

١ -٦ -١ نظام التوزيع الأولي Primary distribution

يوجد ثلاثة أنواع رئيسية لنظم التوزيع الأولي:

- **النظام الإشعاعي (نصف القطري) radial system**

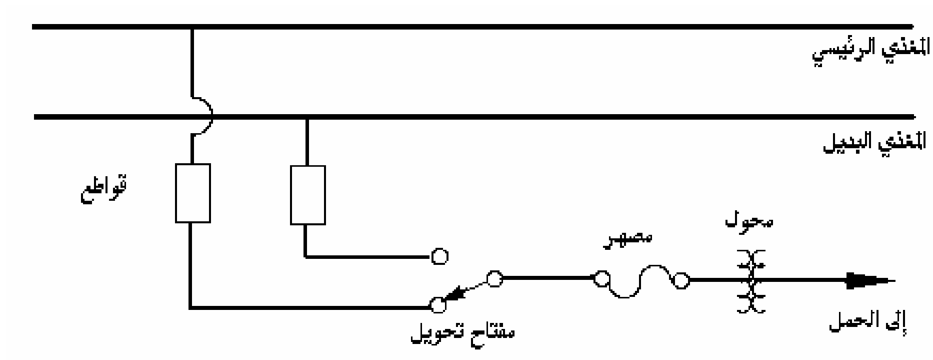
وهو أبسط نظم التوزيع وأكثرها انتشارا في الاستخدام في منظومات القوى الكهربية. يتكون هذا النظام من مجموعة من الدوائر المستقلة التي تخرج من محطة التوزيع ليغذي كل منها منطقة محددة. وكل دائرة تتكون من المغذي الرئيسي main feeder (أو الجذع trunk) والذي تتفرع منه فرعيات spurs or laterals والتي يتصل محولات التوزيع، وتكون هذه الفرعيات متصلة بالمغذي الرئيسي عن طريق مصهرات حتى لا يتسبب حدوث أي خطأ في أي من الفرعيات في فصل المغذي الرئيسي بالكامل. شكل ١ -٨ يبين مثالا لهذا النظام.



شكل ١ -٨ نظام توزيع نصف قطري (إشعاعي)

وفي حالة حدوث خطأ على أحد الفرعيات وفشل المصهر في العمل ولم يتم فصل الجزء الذي حدث به الخطأ فإن القاطع الموجود في بداية المغذي سيعمل مسببا فصل المغذي بأكمله، ولتقليل مجال الانقطاع في الخدمة ومدته فإنه يتم تقسيم المغذي إلى مقاطع sections حيث يمكن إعادة تغذية المقاطع البعيدة عن الخطأ بأسرع وقت ممكن، وذلك عن طريق ربطها بأقرب مغذٍ لها باستخدام روابط الطوارئemergency ties المعدة خصيصا لهذا الغرض. وعادة ما يتم تصميم المغذي بحيث يتوافر سعة احتياطية spare capacity لتغذية أي أحمال إضافية يتم نقلها إليه من المغذيات القريبة حالة حدوث أخطاء بها.

وفي حالة المستشفيات والمنشآت العسكرية والأحمال المهمة لا يمكن تحمل انقطاع التيار لفترة طويلة، ولذلك يتم استخدام مغذٍ ثان أو عدة مغذيات أخرى كل منها له مساره المستقل لتوفير مصدر أو مصادر بديلة لتغذية هذه الأحمال في حالة حدوث خطأ على المغذي الرئيسي. ويتم نقل تغذية الأحمال من المغذي الرئيسي إلى المغذي البديل عن طرية مفتاح تحويل الحمل load transfer switch والذي قد يكون قاطع يعمل يدويا أو بطريقة آلية. وفي معظم الأحيان يستخدم قاطعان كل منهما على مغذٍ ويستخدم نظام منع interlocking كي يضمن توصيل قاطع واحد فقط وعند حدوث خطأ يفصل هذا القاطع ويقوم بتوصيل الآخر، شكل ١ -٩.



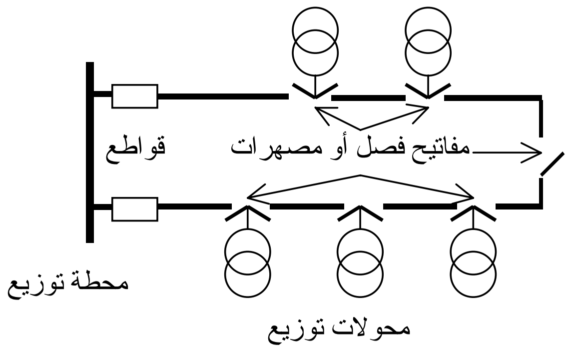
شكل ١ -٩ نظام المغذي البديل لتغذية الأحمال المهمة

- النظام الحلقي **ring (loop) system**

وفي هذا النظام يكون المغذي الرئيسي مسارا مغلقا يبدأ من محطة التوزيع وينتهي فيها، أي أن نهايتي الموزع تكونان داخل نفس المحطة، و هذا التركيب يتيح مسارين لتغذية كل من الأحمال الموجودة على المغذي من اتجاهين مختلفين. وعند حدوث خطأ في أحد الاتجاهين يتم تغذية الأحمال من الاتجاه الآخر، ويمكن تشغيل هذا النظام بطريقتين مختلفتين:

أ. الحلقة المفتوحة **open loop**

في هذا النظام تكون مقاطع المغذي متصلة ببعضها عن طريق مفاتيح فصل disconnecting switches أو مصهرات وطرفي المغذي متصلين بالمصدر، وعند نقطة معينة على المغذي يتم فصل المفتاح ويكون المغذي كأنه مغذيان منفصلان عن بعضهما، شكل ١ -١٠، ويتم تحديد هذه النقطة بطريقة تقلل الفقد في القدرة والهبوط في الجهد، وعادة تكون النقطة التي ينعكس عندها اتجاه سريان التيار في المغذي.

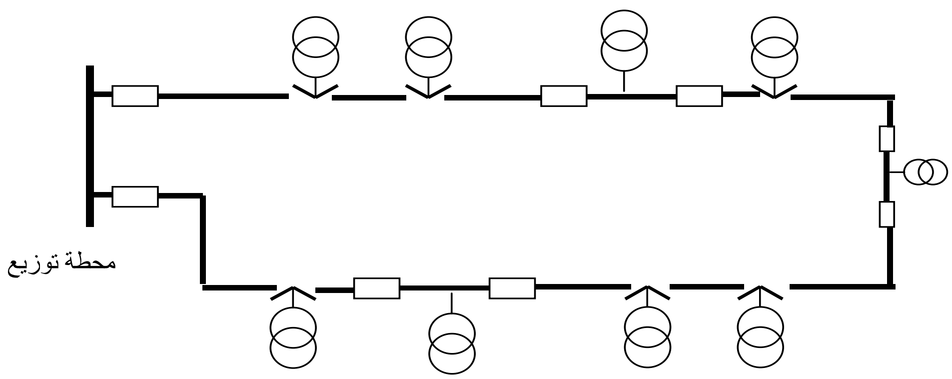


شكل ١ -١٠ مغذي حلقي مفتوح

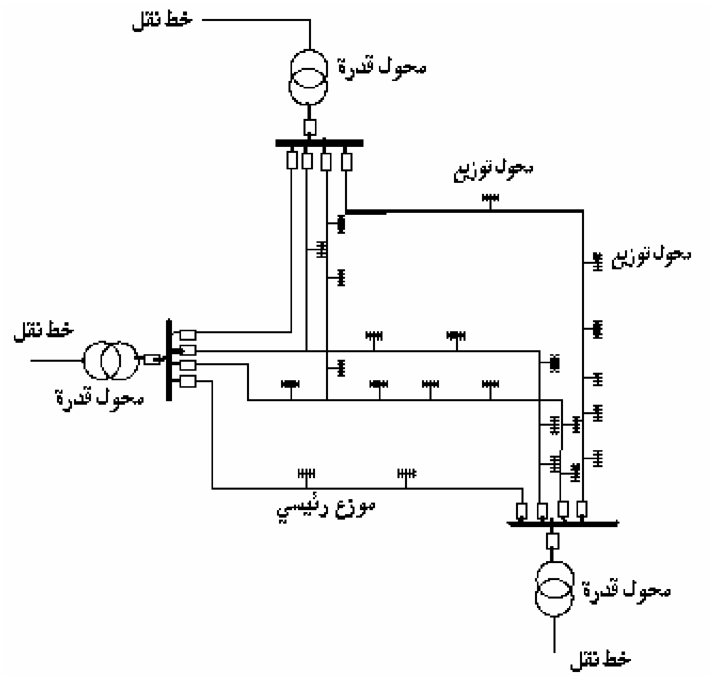
وفي حالة حدوث خطأ على أحد مقاطع المغذي يتم فصل المقطع الذي حدث به الخطأ من كلتا جهتيه وتوصل الخدمة إلى الأجزاء السليمة عن طريق توصيل المفتاح الذي كان مفصولا –لفتح الحلقة - وكذلك إعادة توصيل القاطع الذي فصل نتيجة للخطأ.

ب. الحلقة المغلقة closed loop

يستخدم هذا النظام عندما يكون مطلوبا تغذية الأحمال بدرجة موثوقية عالية وفيه لا يتم فصل أي من نقاط المغذي بل يترك للعمل كحلقة مغلقة، وهنا تكون أجهزة الفصل عبارة عن قواطع أوتوماتيكية يتم التحكم في تشغيلها عن طريق مرحلات. وفي حالة حدوث خطأ على أحد مقاطع المغذي تقوم المرحلات بفصل القواطع في بداية ونهاية المقطع الذي حدث به الخطأ تاركة باقي أجزاء المغذي تعمل كحلقة مفتوحة إلى أن يتم إصلاح للخطأ. ولتقليل التكلفة يمكن استخدام قواطع أوتوماتيكية بين بعض المقاطع فقط واستخدام أجهزة فصل رخيصة كالمفاتيح أو المصهرات بين باقي المقاطع كما هو موضح في شكل ١ -١١.



شكل ١ -١١ مغذي حلقي (حلقة مغلقة)



شكل ١ -١٢ نظام شبكة التوزيع الأولي

- **نظام شبكة التوزيع الأولي primary network system**

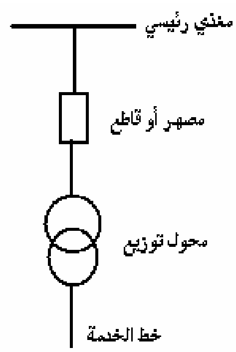
في هذا النظام يتم ربط المغذيات معا مكونة شبكة يتم تغذيتها عن طريق عدد من محولات القدرة التي بدورها يتم تغذيتها عن طريق خطوط النقل عند جهود عالية. ورغم أن جميع الدراسات الاقتصادية تؤكد أنه في ظروف معينة يكون النظام الشبكي هو الأقل تكلفة والأكثر موثوفية إلا أنه الأقل استعمالا، والسبب في ذلك يرجع إلى أن حماية هذا النظام تكون أكثر تعقيدا من حماية النظم الأخرى وذلك لارتفاع مستوى القصر وكذلك لوجود إمكانية تغذية الخطأ من أماكن متعددة حال حدوثه. شكل ١ -١٢ يبين رسما توضيحيا لهذا النظام.

١ -٦ -٢ نظام التوزيع الثانوي secondary distribution

- يعمل هذا النظام عند جهد منخفض وهو جهد الاستغلال (١١٠ فولت – ٢٢٠ فولت في المملكة) وهو الذي يقوم بتغذية المستهلكين وهو آخر أجزاء منظومة القوى من ناحية المستهلك، ويوجد أربعة أنواع مختلفة لهذه النظم.

- **محول مستقل لكل حمل**

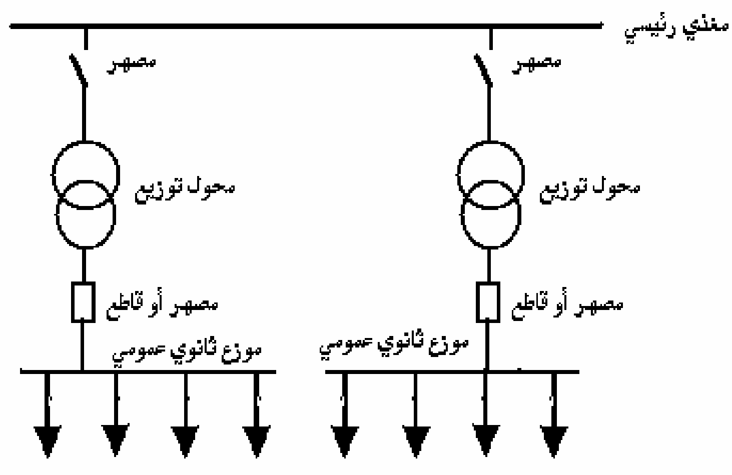
ويستخدم هذا النظام للأحمال المعزولة البعيدة عن الشبكة حيث يكون تمديد شبكات التوزيع الثانوي لمسافة طويلة غير اقتصادي ويستخدم كذلك للأحمال الكبيرة، شكل ١ -١٣ يوضح هذا النظام



شكل ١ -١٣ محول مستقل لكل حمل

- **موزع ثانوي عمومي common secondary feeder**

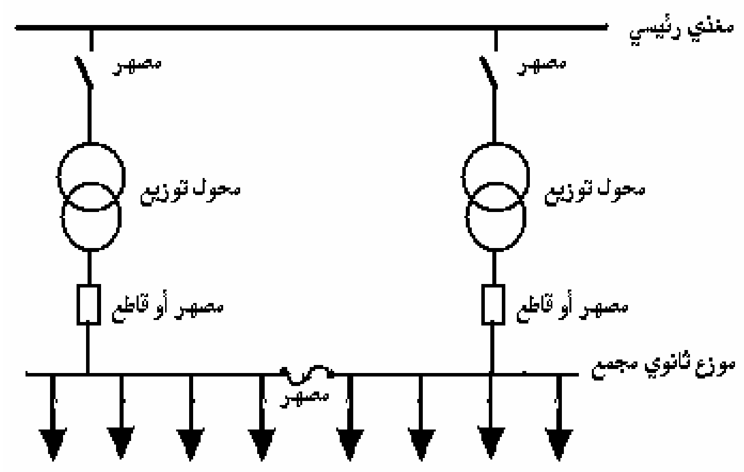
وفي هذا النظام يتم تغذية عدد كبير من الأحمال من نفس المحول عن طريق موزع ثانوي عمومي وهو أكثر النظم انتشارا وقد يكون هذا الموزع الثانوي خط هوائي أو كابل أرضي، و عند حدوث خطأ في أحد محولات التوزيع يمكن تغذية أحماله عن طريق توصيلها بمحول آخر ولكن في وضع التشغيل العادي تكون الموزعات الثانوية مفصولة عن بعضها البعض كما في شكل ١ -١٤.



شكل ١ -١٤ موزع ثانوي عمومي

• موزعات ثانوية مجمعة **banked secondary feeder**

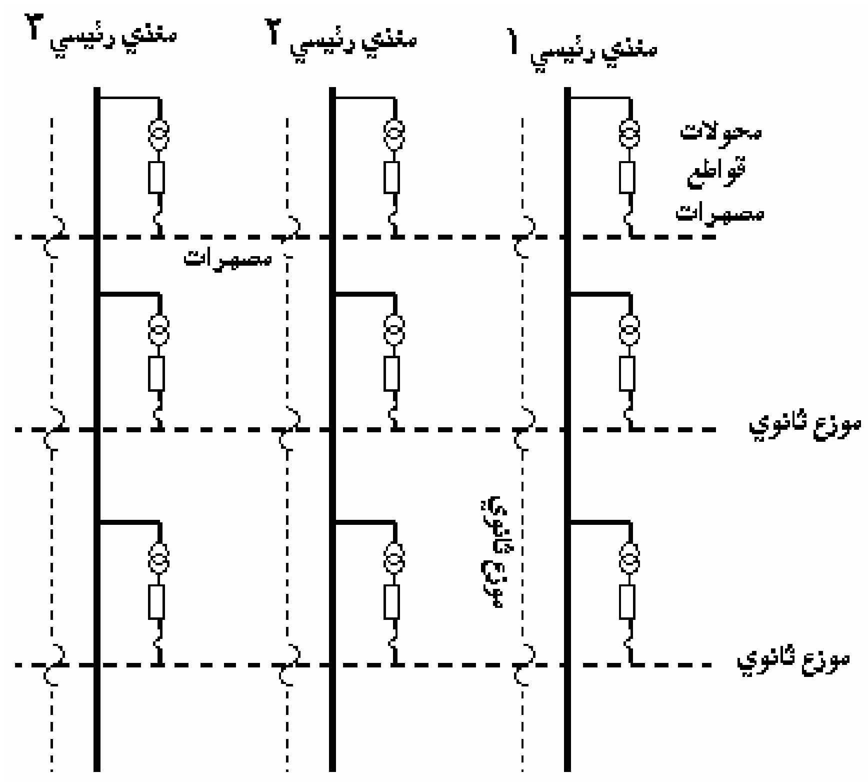
وهو مماثل تماما للموزع الثانوي العمومي إلا أنه في هذه الحالة تكون الموزعات الثانوية لمحولات التوزيع مربوطة مع بعضها عن طريق مصهرات كما في شكل ١ -١٥. ومثل هذا النظام يتيح استغلالا أفضل للمحولات ويعطي إمكانية لتقسيم الحمل على محولات التوزيع بأفضل طريقة.



شكل ١ -١٥ موزعات ثانوية مجمعة

• شبكة توزيع ثانوي **secondary distribution network**

وفي هذا النظام يتم ربط الموزعات الثانوية مع بعضها البعض مكونة شبكة يتم تغذيتها من عدة محولات توزيع متصلة بعدد من المغذيات الأولية الرئيسية كما في شكل ١ -١٦.



شكل ١ -١٦ شبكة توزيع ثانوي

١ -٧ محول التوزيع

هو المحول الذي يستخدم لتخفيض الجهد إلى مستوى آمن للاستخدام ولذلك فهو آخر محول يربط المستهلك بالشبكة ويكون آخر محول يربط المستهلك بالشبكة، الجهد الابتدائي لهذا المحول يتراوح بين ٢,٣ ك ف وحتى٣٤,٥ ك ف وجه واحد أو ثلاثة أوجه حسب حجم المستهلك والجهد الثانوي عادة ما يكون ٢٧٧/٤٨٠ أو ١٢٠/٢٠٨ ثلاثي الأوجه، ١٢٠/٢٤٠ وجه واحد وفي هذه الحالة يستخدم محول أن معا أو محول واحد ذو ثلاث ملفات.

محولات التوزيع غالبا ما تكون من النوع الجاف وخصوصا عندما يكون عنصر التكلفة عاملا محددا، و أكثر أنواع محولات التوزيع شيوعا هي تلك المحمولة على قمم الأعمدة الخشبية أو الأبراج الحديدية وقدرة هذه المحولات تتراوح بين ١٥ و ١٠٠ ك ف أ

وقد تثبت محولات التوزيع داخل أكشاك معدنية مغلقة كجزء من نظام التوزيع الذي يستخدم الكابلات الأرضية وعندما يكون الشكل الخارجي عاملاً مهماً و توجد أنواع من محولات التوزيع التي يمكن وضعها تحت الأرض وتعرف بالمحولات الأرضية أو محولات الأنفاق subway transformers.

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

شبكات كهربائية

تركيبات خطوط النقل الكهربائي

تركيبات خطوط النقل الكهربائي

٢

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذا الفصل تكون:

١. ملما بالمواد المستعملة في صناعة الموصلات الكهربائية وكذلك بأنواع أبراج خطوط النقل الكهربائي
٢. ملما بكيفية حساب الترخيم بين برجين مع الأخذ في الاعتبار العوامل المؤثرة عليه.

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب :

الوسائل المساعدة :

١. استخدام التعليمات في هذا الفصل .
٢. صور فوتوغرافية ورسوم توضيحية توضح عمليات تركيب خطوط النقل

متطلبات الجدارة:

١. يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

٢ -١. مقدمة

الوظيفة الأساسية لخطوط النقل الكهربائي هي نقل القدرة الكهربية من مكان إلى آخر، والمكون الرئيسي لخط النقل هو الموصل حيث إن الموصل هو الناقل الفعلي للطاقة الكهربية أما باقي تركيبات خطوط النقل فهي إما لحمل وتثبيت الموصل أو لعزل الموصلات عن الأرض وعن بعضها البعض، وخطوط النقل الكهربائي غالبا ما تكون في صورة خطوط نقل هوائية فوق الرأس، ويطلق عليها الخطوط الهوائية لكون الهواء هو العازل الرئيسي بين الموصلات وبعضها حيث تستخدم الموصلات المكشوفة غير المعزولة محمولة على أبراج لرفع هذه الموصلات عن سطح الأرض بمسافة كافية لتوفير الأمان، وكذلك للحفاظ على المسافة بين الموصلات ثابتة، وتكون الموصلات معزولة عن جسم البرج باستخدام عوازل من البورسلين أما على طول مسار الخط يكون الهواء هو العازل بين الموصلات والأرض وبين الموصلات وبعضها.

وخطوط النقل يجب أن تتوافر لها الخصائص الآتية:

- يجب أن يكون الجهد ثابتا على طول الخط
- يجب أن يكون الفقد في القدرة أقل ما يمكن حتى تكون كفاءة النقل عالية وتكلفة النقل أقل ما يمكن
- يجب أن لا يتسبب الفقد في القدرة في تسخين الموصل لدرجة تسبب تغييرا في الخواص الكهربية والميكانيكية للموصل
- يجب أن يتحمل الموصل الإجهاد الميكانيكي الواقع عليه نتيجة وزنه وكذلك نتيجة لتراكم الثلوج أوتأثير ضغط الرياح عليه

وسوف نتعرف في هذا الباب على أهم الاعتبارات الخاصة بتركيبات خطوط النقل الهوائية حيث سنتعرف على أهم المواد المستعملة في صناعة موصلات خطوط النقل وكذلك على الأشكال المختلفة لأبراج خطوط النقل الكهربائي.

وحيث إن الترخيم في الموصلات من أهم الاعتبارات التي يجب أن تؤخذ في الحسبان عند تصميم وإنشاء خط النقل لما له من علاقة مباشرة بالإجهاد الميكانيكي المؤثر على الموصل ولأن مقدار الترخيم يحدد مقدار الخلوص بين الموصل والأرض والذي يجب أن لا يقل عن حد معين يتم تحديده تبعا لمستوى جهد الخط طبقا لاشتراطات الأمن والسلامة المعمول بها في هذا المجال فإننا سوف ندرس كيفية حساب الترخيم عندما يكون الخط معلقا بين برجين متماثلين على أرض مستوية، وكذلك عندما تكون نقاط تثبيت الموصل ليست على نفس المستوى وذلك عندما يكون الموصل معلقا بين برجين مختلفين أو عندما

يكون مسار الخط مارا بمنطقة جبلية أو هضابية. وسندرس أيضا كيفية حساب تأثير تراكم الثلوج وضغط الرياح على مقدار الترخيم والشد في الموصل.

٢_٢. المواد المستعملة في صناعة الموصلات

الموصل هو الجزء الرئيس في خط النقل حيث إنه هو الناقل الذي يقوم بنقل الطاقة الكهربية من مكان إلى آخر والموصلات المستخدمة في خطوط النقل غالبا ما تكون مكشوفة أي غير مغطاة بمادة عازلة وتكون معلقة بين أعمدة أو أبراج تبعد عن بعضها مسافات قد تصل في بعض الأحيان أكثر من ٢٥٠ مترا وهذه المسافة تعرف بباع البرج أو بحر السلك "span".

وكون الموصل معلقا يجعله دائما واقعا تحت تأثير وزنه الذي يؤثر رأسيا إلى أسفل مسببا إجهاد شد في الموصل، ولذلك فإنه يجب أن تكون المادة التي يصنع منها الموصل ذات متانة ميكانيكية عالية تجعلها تتحمل الإجهاد الواقع عليها، وأن تكون خفيفة الوزن حتى تكون قوة الشد المؤثرة على الموصل قليلة وحتى يمكن زيادة المسافة بين الأبراج لتقليل تكلفة إنشاء الخط، وعموما فإن اختيار مادة الموصل في خطوط النقل يخضع لعدة اعتبارات:

- المسافة بين البرجين و مقدار الترخيم المسموح به
- الشد في الموصلات
- ما إذا كان الجو المحيط يحتوي على مواد أكالة أي تسبب تآكل الموصلات أم لا
- هل سيكون الخط معرضا للاهتزازات أم لا
- الفقد في القدرة على الخط
- الهبوط في الجهد على الخط
- الطقس والعوامل المناخية في موقع الخط
- مساحة مقطع الموصل أو حجم الموصل ويتم تحديد حجم الموصل بناءً على مجموعة من الاعتبارات كالهبوط في الجهد والسعة الحرارية للموصل واعتبارات اقتصادية خاصة بتكلفة الموصل.

والمواد التي يمكن استخدامها في صناعة الموصلات كثيرة كالنحاس والألومونيوم وغيرها، وللحكم على مناسبة أي منها لصناعة موصلات خطوط النقل يلزم المفاضلة بين الخصائص الميكانيكية (كالمتانة الميكانيكية ومعامل المرونة ومعامل التمدد الحراري) والخصائص الكهربية (كالموصلية) لكل من هذه المواد واختيار المادة التي لها أفضل مجموعة من الخواص بأقل تكلفة، وفيما يلي سنتعرف على خصائص المواد المستعملة في صناعة الموصلات.

الموصلية Conductivity

يجب أن تكون المادة التي تصنع منها موصلات خط النقل ذات موصلية عالية وذلك حتى يكون الفقد في القدرة على الخط أقل ما يمكن حتى تكون عملية النقل اقتصادية. حيث إن الفقد في القدرة (P_L) في خط ثلاثي الأوجه يمكن حسابه كالآتي:

$$P_L = 3I^2R \qquad (٢،١)$$

$$R = \frac{L}{\sigma . a} \qquad (٢،٢)$$

حيث R هي مقاومة موصل الوجه الواحد مقدرة بالأوم (Ω)

L طول الموصل مقدرا بالمتر (m)

(a) مساحة مقطع الموصل مقدرة بالمتر المربع (m^2)

(σ) الموصلية للمادة المصنوع منها الموصل مقدرة بالأوم.متر (Ω.m)

وواضح من المعادلة (٢،٢) أنه كلما زادت الموصلية قلت مقاومة الموصل وقل بالتبعية الفقد في القدرة في الخط، وإذا زادت الموصلية يمكن أيضا استخدام موصلات ذات مساحة مقطع أقل مما يؤدي إلى توفير في مادة الموصل وتوفير في تكلفة الموصل المستخدم.

المتانة الميكانيكية Mechanical Strength

تقاس المتانة الميكانيكية بأقصى إجهاد تتحمله المادة، وعادة ما تستخدم نسبة المتانة إلى الوزن للمفاضلة بين المواد المختلفة حيث إنه كلما كانت نسبة المتانة إلى الوزن أكبر أمكن زيادة خطوة البرج وتقليل تكلفة إنشاء الخط.

معامل المرونة Modulus of Elasticity

يعرف معامل المرونة (معامل يونج) لأي مادة بأنه نسبة الإجهاد الواقع على المادة إلى الانفعال الحادث لها. (الانفعال هو مقدار التغير الحادث في أبعاد المادة منسوبا إلى أبعادها الأصلية)، وكلما كان معامل المرونة لمادة الموصل أكبر كلما كان الموصل قادرا على الحفاظ على أبعاده دون تغيير، لأن استطالة الموصل تحت تأثير إجهاد الشد الواقع عليه تؤدي إلى نقص مساحة المقطع مما يؤدي إلى ضعف الموصل وانقطاعه.

معامل التمدد الحراري Heat expansion coefficient

حيث إن خطوط النقل الهوائية تكون معرضة للتغيرات المناجية نظرا لوجودها بالعراء فهي عرضة للتغيرات في درجة الحرارة من درجات تقترب من درجة التجمد في الشتاء إلى درجات تربو على ٤٠ درجة مئوية وقد تصل إلى ٥٠ وأكثر في بعض المناطق، فإذا كان معامل التمدد الحراري للموصل كبيرا فإن أسلاك خط النقل ستمدد لدرجة تجعلها تقترب من الأرض في الصيف في حين أنها ستنكمش انكماشا شديدا في الشتاء مما يزيد الشد في الموصل ويجعله ينقطع، ولهذا السبب فإنه يفضل صناعة الموصل من مادة ذات معامل تمدد حراري صغير.

التكلفة Cost

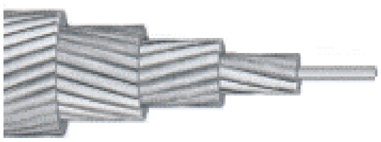
والتكلفة من أهم العوامل المؤثرة في اختيار مادة الموصل وذلك للمحافظة على تكلفة نقل الطاقة الكهربية أقل ما يمكن، والمادة التي يصنع منها الموصل يتم اختيارها بحيث يكون لها أفضل مجموعة من الخصائص بأقل تكلفة.

وبالنظر إلى المواد الموصلة نجد أن الفضة لها أعلى موصلية كهربية ولكن تكلفتها العالية تحول دون استخدامها كموصل كهربي إلا في بعض التطبيقات الدقيقة المحدودة جدا. وبعد الفضة من حيث جودة التوصيل الكهربي يأتي النحاس، والنحاس كمادة موصلة يتمتع بموصلية عالية لا يفوقه فيها إلا الفضة وتكلفتة أقل بكثير من الفضة، ويمكن بالمعالجات الحرارية أن نحصل على خواص مختلفة فمثلا النحاس المسحوب على البارد هو أفضل أنواع النحاس توصيلا للكهرباء ولكن تنقصه المرونة، في حين أن النحاس الأحمر المخمر أقل قليلا في الموصلية والمتانة الميكانيكية ولكنه يتمتع بمرونة عالية ولذلك يستخدم في تصنيع أسلاك التمديدات الداخلية للمباني والمصانع، في حين يستخدم النحاس المسحوب على البارد في تصنيع القضبان العمومية والموصلات التي تحتاج إلى متانة ميكانيكية عالية، وأدت كثرة الطلب على النحاس - لما له من خواص مميزة في التوصيل في التوصيل الكهربي والمتانة الميكانيكية - إلى ارتفاع سعره لدرجة تجعله غير مناسب اقتصاديا لتصنيع موصلات خطوط النقل الهوائي إلا في أضيق الحدود وحين تكون هناك ضرورة تقنية ملحة كأن تكون المتانة الميكانيكية للموصلات مطلباً أساسياً كما في الموصلات الهوائية الخاصة بوسائل النقل الكهربائي كالترام ومترو الأنفاق.

والمادة الأكثر استعمالا في صناعة موصلات خطوط النقل الهوائي هي الألومونيوم حيث إن الألومونيوم يتمتع بخصائص تؤهله لأن يكون بديلاً جيداً للنحاس وهي أن الألومونيوم له موصلية عالية تزيد على ٦٠٪ من موصلية النحاس، ويتمتع الألومونيوم إلى جانب الموصلية العالية نسبيا بخفة الوزن

ورخص الثمن، وإذا كانت المتانة الميكانيكية للألومونيوم أقل من النحاس فإنه يتم التغلب عليها بطرق مختلفة سنستعرضها فيما يلي ونحن نستعرض أهم أنواع موصلات خطوط النقل المستخدمة فعلا في الحياة العملية.

٢_٣. أنواع الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائي



شكل ٢-١ موصل مجدول

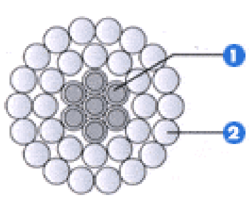
معظم الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائية تكون عبارة عن جديلة مكونة من قلب عبارة عن سلك واحد مستقيم محاط بطبقة أو أكثر من الأسلاك المجدولة بطريقة حلزونية حول هذا القلب ويكون اتجاه جَدْل الأسلاك في كل طبقة مخالفاً لاتجاه الجَدْل في الطبقة السابقة كما هو موضح بشكل ٢ -١. وبالإضافة إلى الموصلات المجدولة المصنوعة من النحاس أو من سبيكة النحاس والكادميوم يوجد عدة أنواع من الموصلات المبنية على الألومونيوم والتي تعطي أفضل الحلول لمتطلبات خطوط النقل الهوائية في الظروف المختلفة.

٢_٣_١. الألومونيوم All Aluminum Conductor AAC

أرخص أنواع الموصلات حيث إنه أرخص من أي موصل آخر يمكن أن يستخدم لنفس التيار ولكن المتانة المنخفضة لهذا النوع من الموصلات تجعله مناسبا فقط عندما تكون خطوة البرج قصيرة.

٢_٣_٢. الألومونيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Reinforced ACSR

يتكون هذا الموصل من قلب عبارة عن طبقة أو أكثر من أسلاك الصلب المجلفن المحاطة بطبقة أوأكثر من أسلاك الألومونيوم، كما هو موضح بالشكل ٢ -٢، ويتم تعريف هذه الموصلات بعدد أسلاك الألومونيوم وأسلاك الصلب وأكثر موصلات هذا النوع شيوعا هي الموصلات ٢٦/٧ أي التي تتكون من ٢٦ سلك ألومونيوم و ٧ أسلاك من الصلب إلا أنه توجد أنواع كثيرة بنسب مختلفة من أسلاك الصلب والألومونيوم.



١. قلب من أسلاك الصلب
٢. أسلاك الألومونيوم
شكل ٢-٢ موصل ACSR

هذا النوع من الموصلات له متانة أعلى من موصلات الألومونيوم ولذلك يستخدم عندما تكون المسافة بين الأبراج أكبر ويمكنه كذلك تحمل الظروف الجوية السيئة وله كذلك معامل مرونة أعلى ومعامل تمدد حراري أقل من الألومونيوم ولذلك فإن خصائصه الميكانيكية

أعلى بكثير من الألومونيوم ويمكن التحكم في هذه الخصائص بتغيير نسبة الألومونيوم إلى الصلب في الموصل المجدول.

٢_٣_٣. موصلات سبائك الألومونيوم All Aluminum Alloy Conductor AAAC

وهذا النوع عبارة عن سبيكة متجانسة معالجة حراريا من الألومونيوم والماغنسيوم والسيليكون، وهذا الموصل له خصائص تميزه عن AAC, ACSR حيث إن له متانة عالية جداً (له أكبر نسبة متانة/الوزن) وذلك يتيح زيادة المسافة بين الأبراج والتقليل في تكلفة إنشاء الخط أو زيادة قدرة حمل التيار عند استخدامه على الأبراج الموجودة فعلا وتحسين أداء الخط. وهذا الموصل له مقاومة كهربية أقل وبالتالي يسبب فقد أقل في القدرة على الخط، و هو أيضا غير معرض لمشكلة تآكل الجلفنة كما في موصلات ACSR وتركيباته أقل تعقيدا وأسطحه أقل عرضة للتلف ولذلك يكثر استخدام هذا النوع من الموصلات في الخطوط الحديثة.

٢_٣_٤. الألومونيوم المقوى بسبيكة الألومونيوم Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR

وهو مشابه تماما ل ACSR ولكن مع استبدال القلب المكون من أسلاك الصلب بأسلاك من سبيكة الألومونيوم وبذلك يعطي خصائص بين خصائص موصلات الألومونيوم وموصلات الألومونيوم المقوى بالصلب.

٢_٣_٥. سبيكة الألومونيوم المقواه بالصلب Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced AACSR

وهو مشابه ل ACSR حيث يحتوي على قلب مكون من أسلاك الصلب ولكن تستبدل أسلاك الألومونيوم بأسلاك من سبيكة الألومونيوم، وهذا النوع له متانة ميكانيكية عالية على حساب الموصلية ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات عندما تكون مثل هذه الخصائص مرغوبة وخصوصا في أسلاك الأرضي.

٢_٤. أبراج خطوط النقل الكهربائي

وظيفة أبراج خطوط النقل هي تثبيت الموصلات ويجب أن تكون هذه الأبراج محصورة داخل حقوق المرور المتاحة ومطابقة للاعتبارات الجمالية للمنطقة التي يتم تركيبها بها فالأبراج التي تستخدم لحمل خطوط النقل في الصحراء لا تصلح بحال لحمل أسلاك الكهرباء داخل المدن، وهناك العديد من الوسائل المستخدمة لحمل وتثبيت خطوط النقل و هي:

الأعمدة الخشبية

تعتبر الأعمدة الخشبية أرخص أنواع الأعمدة وتصنع من أخشاب شجر الأَرز والصنوبر وذلك لطولها واستقامتها وتتوافر الأعمدة الخشبية في أطوال تبدأ من ٢٥ قدم حتى ١٣٠ قدم أو أكثر حسب الطلب وبزيادة مقدارها ٥ أقدام. وتتميز الأعمدة الخشبية بمرونتها حيث تنحني إذا تعرضت لأحمال ميكانيكية عالية ثم تعود إلى وضعها الطبيعي بزوال الحمل وهذه الخاصية تجعلها ملائمة تماما لأغراض تثبيت الموصلات ولذا ينصح باستعمالها كلما أمكن ذلك، لأنه في حالة تعرض الموصلات لقوى شديدة كتلك الناتجة عن عاصفة مثلاً فإن حركة العمود الخشبي تمتص هذه القوة وتخفف من تأثيرها على الموصلات.

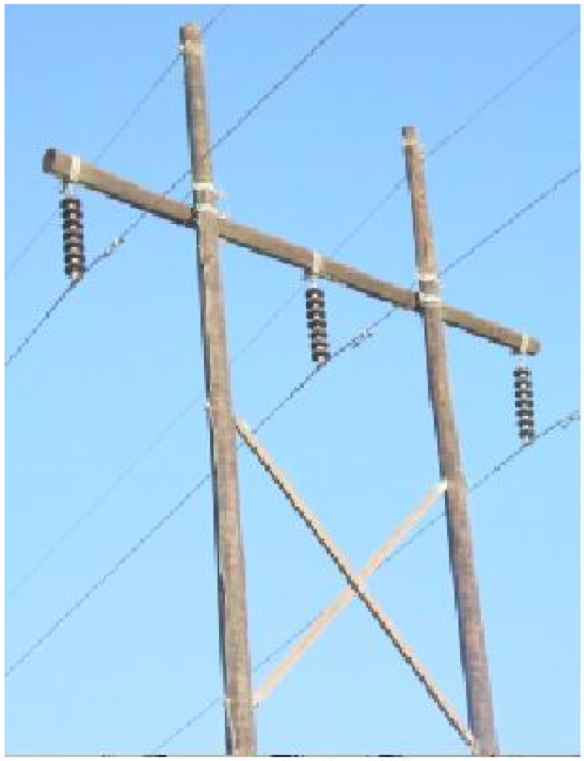
بعد قطع الخشب وتجفيفه وعمل التجاويف والنقر المطلوب لتثبيت الأذرع المستعرضة يتم معالجة الخشب بمشتقات قطران الفحم – عادة الكريوزوت - حتى يتشبع تماما وهذه المعالجة تجعل عمر الخشب يتراوح ما بين ٤٠ -٥٠ سنة ما لم يهاجم بواسطة العفن أو نقار الخشب اللذان يمثلان أكبر عدوين للأعمدة الخشبية.



شكل ٢-٣
عمود خشبي مفرد

وتبعا لمتطلبات الحالات المختلفة يمكن استخدام الأعمدة الخشبية في صورة عمود مفرد كما في شكل ٢ -٣ أو في صورة تركيبات على شكل حرف H كما في شكل ٢ -٤. وتتميز الأعمدة المفردة بأن حق المرور المطلوب لها أقل ما يمكن في حين أن ما يحد استعمال الأعمدة الخشبية المفردة هو أقصى جهد يمكن وضعه على عمود مفرد والمسافة بين الموصلات وكذلك وزن الموصلات.

وتتميز تركيباتH بأنها متينة وقوية لدرجة تمكنها من تحمل وزن موصلات ذات مساحة مقطع كبيرة ولمسافات كبيرة بين كل وبرجين متتاليين ويمكن كذلك استخدامها لجهود مرتفعة وذلك للإمكانية المتاحة لديها من تثبيت الموصلات على مسافات أكبر، ويعيبها فقط أن متطلبات حق المرور لمثل هذه الأبراج أكبر.



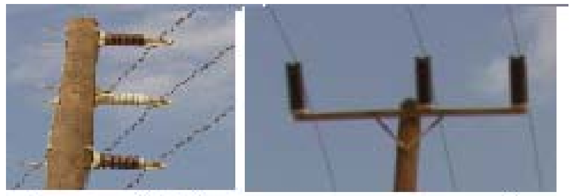
شكل ٢-٤
عمود خشبي على شكل حرف H

وتتميز الأعمدة الخشبية إلى جانب ما ذكرناه بمقاومتها لمرور التيار ويمكن تصنيفها في حالة الجهود المنخفضة كمادة عازلة، وتتميز كذلك بسهولة تركيبها وبحاجتها إلى أساسات بسيطة لتثبيتها.

هيكلة العمود Framing

يسمى العنصر الذي يثبت بالعمود لتثبيت العوازل والموصلات شاملا الصواميل والمسامير وكل ما يلزم لتثبيت هذا العنصر بالهيكلة، والهيكل يحمل الموصلات في المكان المناسب ويحافظ على المسافة بين الموصلات بعضها البعض ويوجد شكلان للهيكلة هما:

- الذراع المستعرض Cross Arm ويحمل موصلين على جانبيه وقد يحمل موصلا ثالثا في المنتصف (شكل ٢ -٥ أ)
- الذراع الكتفي Bracket ويحمل موصل واحد ويثبت على جانب العمود (شكل ٢ -٥ ب)



(أ) ذراع مستعرض (ب) أذرع كتفية
شكل ٢-٥ هيكلة العمود الخشبى

ويمكن استخدام الخشب أو الألياف الزجاجية في صناعة الأذرع المستعرضة ويستخدم الصلب أوالألياف الزجاجية لصناعة الأذرع الكتفية.

و عندما لا يمكن توفير الأعمدة الخشبية بطريقة اقتصادية وعندما تكون المتانة العالية مطلوبة تستخدم الأعمدة الخرسانية والمعدنية، وكذلك عندما يكون الشكل ذا أهمية كبرى حيث يمكن تصنيع الأعمدة الخرسانية والمعدنية بأشكال وألوان عديدة.

الأعمدة الخرسانية

تصنع الأعمدة الخرسانية – وكذلك المعدنية - بمقاطع دائرية أو مربعة أو مضلعة (عادة ستة أوثمانية أضلاع) وتكون مجوفة وذلك لتقليل وزنها الذي مازال يمثل عيبا كبيرا وخصوصا عند تداولها أثناء النقل والتثبيت. ويستغل التجويف داخل العمود في تمرير الكابلات التي تقوم بتوصيل الكهرباء من أو إلى أعلى العمود.

وتستخدم أسياخ حديد طولية - عادة ٨ أسياخ - لتقوية العمود وعادة ما تكون سابقة الإجهاد أي معرضة لإجهاد شد عند التصنيع والذي يعادله إجهاد الضغط الواقع على العمود بعد التركيب، ويتم أيضا استخدام أسياخ تسليح عمودية في صورة حلزون ملفوف حول الأسياخ الطولية ويتم لحامه بطريقة تمنع حركة الأسياخ أثناء عملية صب الخرسانة. كل الأعمدة الخرسانية تكون مدببة أي تقل مساحة مقطعها مع ارتفاع العمود والأعمدة المضلعة والمربعة يتم شطف أركانها ويكون بالعمود فتحة لدخول الكابلات وفتحات تسمح بدخول يد العامل أو الفني لسحب وتركيب الكابل في القلب المجوف للعمود. بالإضافة إلى ثقل وزنها فإن الأعمدة الخرسانية أكبر تكلفة من الأعمدة الخشبية وهذا ما يحد من استخدامها وخصوصا عند توافر الأعمدة الخشبية.

وتتميز الأعمدة الخرسانية بالآتي:

لا تتأثر الأعمدة الخرسانية بالتعفن ولا بالطيور ولا بالنار ولا تصدأ و كذلك لا تتأثر بالمواد الكيماوية وهي أقوى وأصلب من الخشب ولا تحتاج إلى صيانة

في حين أن رطوبة التربة والجو تؤثر تأثيرا سلبيا على الأنواع الأخرى من الأعمدة فإنها تعمل لصالح الأعمدة الخرسانية حيث تزيد صلابتها ومتانتها

باعتبار عمر العمود فإن العمود الخرساني يعتبر الأقل تكلفة/السنة بالنسبة لباقي الأنواع من الأعمدة

الأعمدة المعدنية

تصنع الأعمدة المعدنية بأطوال مختلفة وسمك يعتمد على المتانة المطلوبة، وتصنع في أشكال الأعمدة الخرسانية – دائرية أو مربعة أو مضلعة - وتكون مدببة كذلك، وتكون عادة بلون المعدن المصنوعة منه ولكن يمكن طلاؤها بالألوان المطلوبة، ويمكن تثبيتها في الأرض مباشرة، أو في قواعد خرسانية، أو بمسامير في ألواح معدنية مثبتة في قواعد خرسانية.

الأعمدة المعدنية ليس لها مرونة الأعمدة الخشبية ولا حتى عمرها الزمني حيث يتراوح عمر العمود المعدني من ٢٥ حتى ٣٠ سنة في حين يصل عمر العمود الخشبي من ٤٠ – ٥٠ سنة في حالة معالجتها بطريقة تمنع حدوث التعفن ويعتمد عمر العمود المعدني على سمك طبقة الجلفنة. الأعمدة المعدنية أكبر تكلفة من الأعمدة الخشبية ولكن تصبح أكثر اقتصادية للأطوال من ٩٠ – ١٣٠ قدم. السبب الرئيسي لاستخدام الأعمدة المعدنية هو منظرها حيث يعتقد الكثير من الناس أن الأعمدة المعدنية لها شكل أكثر جاذبية أو قبولا من الأعمدة الخشبية، وأكثر استخدامها في إنارة الطرق السريعة والشوارع والملاعب الرياضية وفي المناطق السكنية والتجارية، ويمكن استخدامها في خطوط النقل في صورة أعمدة منفردة أو تكوينات من عمودين أو أكثر.

تتميز الأعمدة المعدنية على الأعمدة الخشبية بسهولة النقل وخصوصا للأعمدة الطويلة حيث يمكن تصنيع العمود المعدني من عدة أجزاء يسهل نقلها ثم يتم تجميعها في موقع التركيب، وأيضا لأنه يمكن تصنيع الأعمدة المعدنية في مواقع عديدة فيسهل نقل الأعمدة من أقرب مواقع التصنيع إلى موقع التركيب بعكس الأعمدة الخشبية التي تعتمد أماكن إنتاجها على أماكن توافر الأشجار.

الأبراج الحديدية

هي عبارة عن تركيب شبكي من عناصر من الصلب المجلفن والتي يتم تجميعها معا بصواميل ومسامير لتكون شكل البرج، و تعتبر الأبراج الحديدية أكثر أنواع الأبراج استخداما حيث إنها:

الأعلى من حيث نسبة المتانة/الوزن

الأطول عمرا وذات تكلفة معقولة

يمكن نقل مكونات البرج بسهولة وتجميعها بسهولة أيضا في مكان التركيب

ورغم أنها تحتاج إلى أساسات خاصة ولكنها غير باهظة التكاليف ولا صعبة التركيب. و تعتمد أبعاد البرج –ارتفاعه والمسافات بين الأذرع المستعرضة واتساعها - على مستوى الجهد، ويعتمد تصميم البرج وطريقة تثبيته على موقعه من الخط. وأنواع الأبراج هي:

١. برج تعليق/تثبيت **suspension/support tower**

وهو البرج الذي يستخدم لتعليق/تثبيت الموصلات وغالبية الأبراج الموجودة في مسار الخط تكون من هذا النوع، ولا يبذل هذا البرج أي شد على الموصل فهو بمثابة نقطة تعليق/تثبيت فقط ويمكن تمييز هذا البرج بوجود عازل واحد لكل موصل. ويختلف برج التعليق عن برج التثبيت في وضع الموصل بالنسبة للعازل، ففي برج التثبيت يكون العازل مثبتا رأسيا لأعلى كما في شكل ٢ -٥ -أ ويكون السلك موضوعا فوق العازل أما في برج التعليق يكون العازل مثبتا رأسيا لأسفل ويكون السلك معلقا في أسفل العازل (شكل ٢ -٦) وفي كلا النوعين لا يكون السلك مربوطا في العازل.

٢. برج الشد **Tension tower**

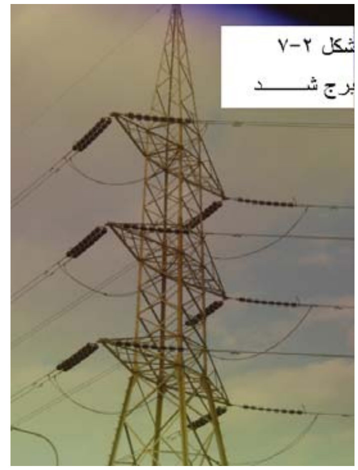
ويمكن تمييز هذا البرج بوجود عازلين عند كل نقطة تثبيت حيث يكون الموصل بينه وبين البرج الذي يسبقه مربوطا بأحد العازلين والموصل بينه وبين البرج الذي يليه مربوطا بالعازل الثاني (شكل ٢ - ٧). ويوضع برج من هذا النوع بعد كل عدة أبراج تعليق – كل عشرة أبراج في المتوسط – وذلك لتفادي سقوط السلك من على الأبراج حالة حدوث قطع فيه. لأنه إذا كانت جميع الأبراج على مسار الخط أبراج تعليق/تثبيت و حدث قطع في الموصل فإن الموصل سيسقط من على جميع الأبراج وسيلزم إعادة تركيب الموصلات على الأبراج وما يلزم ذلك من وقت طويل ومجهود كبير و تكلفة عالية. ولكن في وجود أبراج الشد لن يسقط إلا السلك في المسافة بين برجي الشد الذي حدث بينهما القطع في الموصل. ويكون هذا البرج معرضا لشد متساوٍ من كلتا جهتيه.

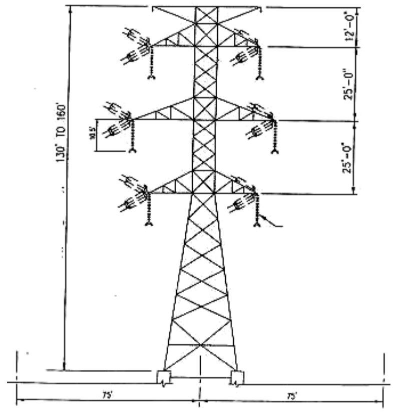
٣. برج الزاوية **Angle tower**

ويشبه إلى حد كبير برج الشد إلا أنه يستخدم عند حدوث تغير في اتجاه خط النقل ويكون طرفا السلك المربوطان به ليسا على استقامة واحدة مما يجعله معرضا لقوة شد تساوي محصلة الشد في الموصلين المربوطين فيه، شكل ٢ -٨.

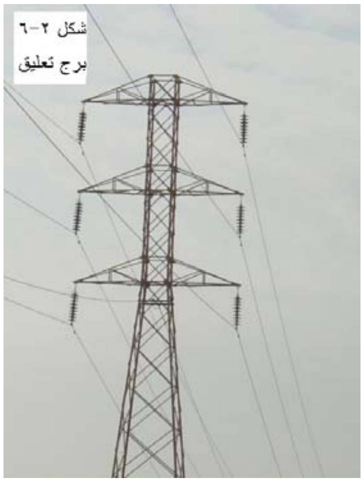
٤. برج النهاية **End tower**

وهذا النوع من الأبراج يوجد في بداية الخط وفي نهايته ويكون معرضا للشد من ناحية واحدة ويلزم أخذ هذا الشد في الاعتبار عند تصميم و تثبيت البرج.


شكل ٢-٧
برج شد

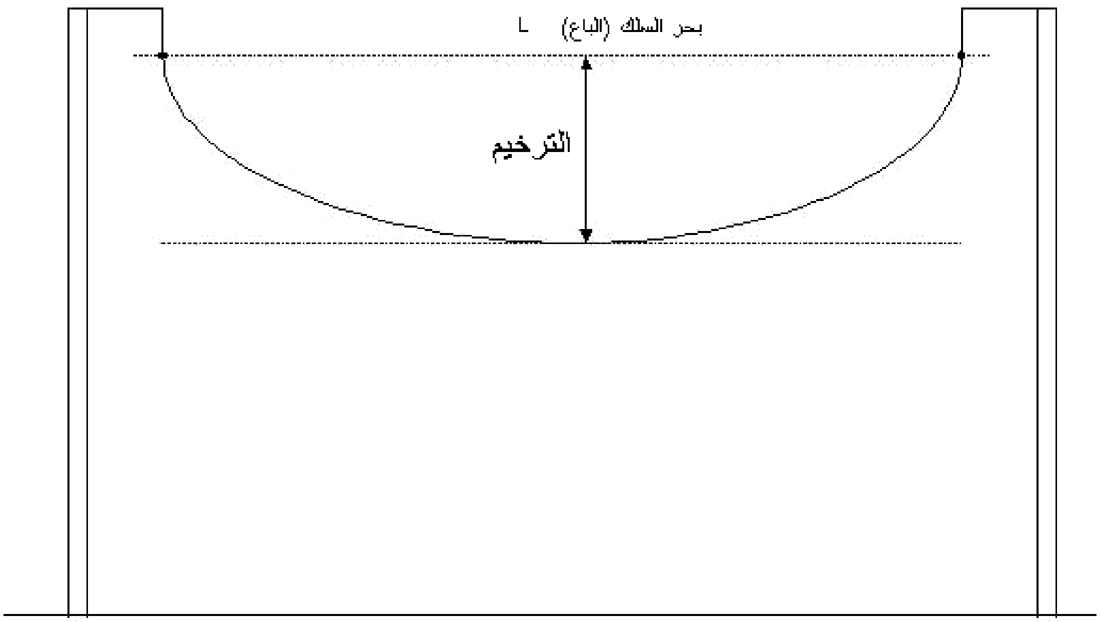


شكل ٢-٨ برج حديدي لخط جهد ٣٤٥ ك ف-زاوية


شكل ٢-٦
برج تعليق

٢ -٥. الترخيم في خطوط النقل الكهربائي

في خطوط النقل الكهربائي تكون الموصلات معلقة على الأبراج عن طريق عوازل تعزلها عن جسم البرج، وفي المسافة بين برجين متتاليين والتي تعرف بالباع أو خطوة البرج أو بحر السلك يكون السلك معلقا تحت تأثير ثقله – و ثقل ما قد يتراكم عليه من ثلوج وتأثير ضغط الرياح إن وجدت – ويتخذ الموصل شكل منحنى تعليق السلاسل (catenary curve)، كما هو موضح بشكل (٢ -٩). والترخيم عند أي نقطة هو مقدار انخفاض هذه النقطة عن مستوى نقطة التعليق. وفي حالة كون نقطتي التعليق على نفس المستوى يحدث أقصى ترخيم في منتصف المسافة بين البرجين. ونظرا لاهتمامنا بالترخيم الأقصى فقط حيث إنه هو الذي يحدد مقدار الخلوص بين الموصل والأرض فإنه عند إطلاق كلمة الترخيم فإننا نقصد بها الترخيم الأقصى وهو مقدار الانخفاض الحادث للسلك عند أقرب نقاطه من سطح الأرض.



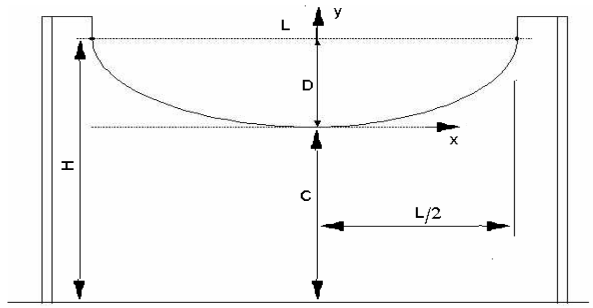
شكل ٢-٩ الترخيم في خط النقل

٢ -٥ -١. العوامل التي تؤثر في الترخيم

يتأثر مقدار الترخيم بعدة عوامل نوجزها فيما يلي:

١. وزن السلك (W_c) وعادة ما يستخدم وزن السلك لكل وحدة طول كمقياس لوزن السلك، وكلما زاد وزن السلك زاد الترخيم
٢. المسافة بين البرجين (الباع L) وكلما زادت المسافة بين البرجين زاد الترخيم
٣. الشد في السلك (T) وهو من العوامل التي تؤثر تأثيرا كبيرا في مقدار الترخيم وكلما زاد الشد في السلك قل الترخيم
٤. العوامل البيئية كتراكم الثلوج على الأسلاك وضغط الرياح وسوف ندرس تأثير هذين العاملين بالتفصيل
٥. درجة الحرارة: كلما زادت درجة الحرارة تمدد السلك وزاد طوله وزاد الترخيم و يحدث العكس عند انخفاض درجة الحرارة

وحسابات الترخيم في خطوط النقل الكهربائي لها أهمية كبرى حيث إنه من خلال هذه الحسابات يمكن تحديد مقدار الخلوص بين السلك والأرض والتأكد مما إذا كان مطابقا لشروط الأمن والسلامة، وأيضا لأن الترخيم يؤثر في مقدار الشد الذي يتعرض له السلك فإنه يجب ضبط الخلوص عند تركيب الموصلات بحيث لا يتعدى الشد في الموصل القيمة المسموح بها حتى عند تعرض الأسلاك إلى أسوأ حالات التحميل الميكانيكي الممكنة.



شكل ٢-١٠ الترخيم بين برجين متماثلين

٢ -٥ -٢. حساب الترخيم بين برجين متماثلين

عندما يكون البرجين متماثلين تكون نقاط تعليق الموصل على نفس الارتفاع وفي هذه الحالة يحدث أقصى ترخيم في منتصف المسافة بين نقطتي التعليق. وكما ذكرنا سابقا فإن السلك يأخذ شكل منحنى تعليق السلاسل، وهذا المنحنى يمكن تقريبه دون التأثير بدرجة كبيرة في دقة الحسابات بمنحنى تربيعي، و إذا اعتبرنا أكثر النقاط انخفاضا هي نقطة الأصل فإن:

$$y = \frac{w_c x^2}{2T} \qquad (٢,٣)$$

حيث w_c هو وزن الموصل لكل متر طولي مقدرا بالكيلوجرام/متر

T الشد في الموصل مقدرا بالكيلوجرام

x, y إحداثيات أي نقطة على الموصل بالنسبة لنقطة الأصل وكل منهما مقدر بالمتر

ومن شكل ٢ -١٠ نجد أن أقصى ترخيم (D) هو قيمة (y) عندما تكون $x = L/٢$ حيث L هي الباع وبالتعويض في معادلة المنحنى نجد أن:

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} \qquad (٢,٤)$$

والخلوص بين الموصل والأرض في هذه الحالة:

$$C = H - D \qquad (٢,٥)$$

حيث H هو ارتفاع نقطة التعليق عن سطح الأرض.

١. مثال ٢ -١ لخط نقل كهربائي كانت المسافة بين البرجين هي m ١٦٠، ووزن الموصل kg/m ٠٫٧٥ والشد في الموصل ٦٠٠kg. فإذا كانت نقطتي التثبيت على نفس الارتفاع H=٢٠ m احسب الخلوص بين الموصل والأرض.

٢. الحل الخلوص = ارتفاع نقطة التثبيت – الترخيم

C = H - D

٣. وحيث أن نقطتي التثبيت على نفس الارتفاع فإن:

٤. $$D = \frac{w_c L^2}{8T} = \frac{0.75 \times (160)^2}{8 \times 600}$$

D = ٤ m

ويكون الخلوص

C = ٢٠ - ٤ = ١٦ m

٥. مثال ٢ -٢ احسب مقدار الترخيم لخط نقل كهربائي مثبت بين برجين متماثلين المسافة بينهما ٢٧٥ متر إذا كان وزن الموصل ٠٫٨٥كجم/متر وأقصى شد يتحمله الموصل هو ٨٠٠٠ كجم ومعامل الأمان المطلوب هو ٢.

٦. الحل: نحسب الشد المسموح به في الموصل

٧. $$\text{الشد المسموح} = \frac{\text{أقصى شد}}{\text{معامل الأمان}}$$

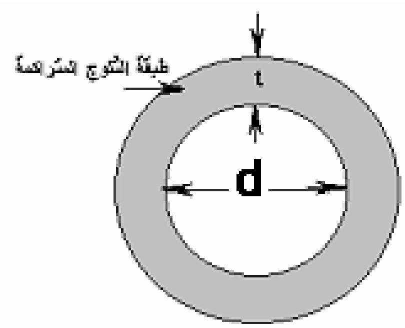
$$T = \frac{8000}{2} = 4000\,\text{kg}$$

نحسب الترخيم w_c=٠٫٨٥ kg/m, L=٢٧٥ m, T=٤٠٠٠ kg

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} = \frac{0.85 \times (275)^2}{8 \times 4000} = 2.\,\text{m}$$

تأثير الثلوج على الترخيم

عند تراكم طبقة من الثلوج سمكها (t) على سطح الموصل كما في شكل ٢ -١١، فإنها تضيف وزنا إضافيا يؤثر إلى أسفل ويضاف إلى وزن الموصل، وهذا الوزن هو عبارة عن وزن الثلج المتراكم. ولحساب هذا الوزن نحسب أولاً حجم طبقة الثلج المتراكم لوحدة الأطوال.



شكل ٢_١١

حجم الثلوج المتراكمة/متر (V_i):

$$V_i = \frac{\pi}{4}((d+2t)^2 - d)^2 \quad = \quad \frac{\pi}{4}(2d+2t).2t$$
$$V_i = \pi(d+t).2t$$

حيث d هو قطر الموصل.

ويكون وزن الثلوج المتراكمة(w_i) مساويا لهذا الحجم مضروبا في كثافة الثلج (ρ):

$$w_i = \pi.\rho.(d+t).t \qquad (٢,٦)$$

وحيث إن وزن الثلج يؤثر رأسيا إلى أسفل في نفس الاتجاه مع وزن الموصل فإنه يتم إضافته مباشرة إلى وزن الموصل ويصبح الوزن الفعلي مساويا وزن الموصل مضافا إليه وزن الثلوج ويستخدم هذا الوزن الفعلي في حساب الترخيم بدلا من وزن الموصل فقط، أي أن:

$$w_e = w_c + w_i \qquad (٢,٧)$$

٨. مثال ٢ -٣ احسب مقدار الترخيم لخط نقل كهربائي مثبت بين برجين متماثلين المسافة بينهما ١٨٠ متر إذا كان وزن الموصل ٠,٦٢٤كجم/متر والشد في الموصل هو ١٢٢٠ كجم إذا كان سمك طبقة الثلوج المتراكمة على الموصل هو ٠,٣ سم ووزن الثلج هو ٩١٠ كجم/م٣.

الحل:

نحسب وزن الثلوج المتراكمة على الموصل (w_i)

$$w_i = \pi.\rho.(d+t).t$$
$$= \pi \times 910 \times (0.94+0.3)\times 10^{-2} \times 0.3 \times 10^{-2}$$
$$w_i = 0.106 kg/m$$

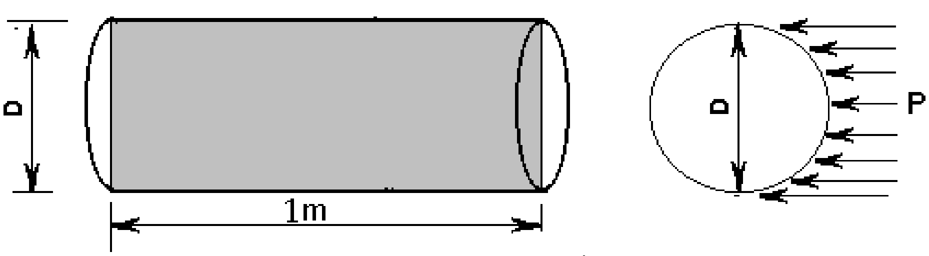
ويكون الوزن الفعال للموصل

$$w_e = w_c + w_i = 0.624 + 0.106$$
$$w_e = 0.730\ kg/m$$

ويكون الترخيم:
$$D = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{0.73\times(180)^2}{8\times 1220} = 2.42\ \text{m}$$

تأثير الرياح على الترخيم

عند تعرض الموصلات لضغط رياح مقداره $P\ kg/m^2$ فإنه يتعرض لقوة تؤثر عليه أفقيا مقدارها يساوي حاصل ضرب ضغط الرياح في المساحة المسقطة للموصل. المساحة المسقطة للموصل لكل متر

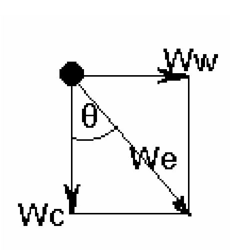


شكل ٢-١٢

طولي (A_p) - المساحة المظللة في شكل ٢ -١٢ - تساوي عدديا قطر الموصل.

أي أن:
$$A_p = d\ .\ 1 \quad m^2$$

والقوة المؤثرة على الموصل نتيجة ضغط الرياح
$$w_w = A_p\ .\ P = d\ .\ P \quad kg/m$$



وهذه القوة تؤثر أفقيا فيكون الوزن المحصل للموصل في هذه الحالة :

$$w_e = \sqrt{w_c^2 + w_w^2} \qquad (٢,٨)$$

ويستخدم هذا الوزن المحصل في حساب الترخيم(D_e)،

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} \qquad (٢,٩)$$

والترخيم في هذه الحالة لا يكون رأسيا وإنما يميل بزاوية (θ) على الرأسي، حيث:

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{w_w}{w_c}) \qquad (٢,١٠)$$

ويكون الترخيم الرأسي (D) والالتواء الأفقي للموصل (D_h) هما مركبتا D_e في الاتجاهين الرأسي والأفقي على الترتيب أي أن:

$$D = D_e \cos(\theta), \qquad D_h = D_e \sin(\theta)$$ (٢,١١)

وفي حالة تعرض الخط لضغط الرياح بالإضافة إلى تراكم الثلوج عليه فإن:

$$w_e = \sqrt{(w_c + w_i)^2 + w_w^2}$$ (٢,١٣)

حيث w_c هو وزن الموصل/متر

w_i هو وزن الثلوج المتراكمة/متر

w_w قوة ضغط الرياح/متر

مع الأخذ في الاعتبار سمك طبقة الثلج عند حساب المساحة المسقطة أي أن:

$$w_w = (d + 2t) \,.\, p \quad kg/m$$

ويتم حساب الترخيم بنفس الطريقة أي أن:

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T}$$

والترخيم الرأسي والالتواء الأفقي:

$$D = D_e \cos(\theta), \qquad D_h = D_e \sin(\theta)$$

إلا أن زاوية الميل على الرأسي تختلف قليلا في هذه الحالة: $\theta = \tan^{-1}(\frac{w_w}{w_c + w_i})$

مثال ٢ -٤ خط نقل هوائي له البيانات الآتية:

المسافة بين البرجين	١٦٠ m
قطر الموصل	٠,٩٥ cm
وزن الموصل	٠,٦٥ kg/m
الشد في الموصل	٦٠٢,٥ kg

احسب الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي إذا كان الخط معرضا لضغط رياح مقداره ٤٠ kg/m^2

الحل:

قوة ضغط الرياح لكل متر من طول الموصل

$$w_w = d \times 1 \times p$$
$$= 0.95 \times 10^{-2} \times 1 \times 40 = 0.38 \quad kg/m$$

الوزن المحصل للموصل:

$$w_e = \sqrt{w_c^2 + w_w^2}$$
$$= \sqrt{(0.65)^2 + (0.38)^2} = 0.7529 \quad kg/m$$

نحسب الترخيم (D_e) وزاوية ميل الموصل على الرأسي (θ):

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T}$$
$$= \frac{0.7529 \times (160)^2}{8 \times 602.5} = 4 \text{ m}$$
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w_w}{w_c}\right)$$
$$= \tan^{-1}\left(\frac{0.38}{0.65}\right) = 30.31^\circ$$

نحسب الترخيم الرأسي:

$$D = D_e \cos(\theta)$$
$$= 4 \times \cos(30.31) = 3.45 \text{ m}$$

ويكون الالتواء الأفقي:

$$D_h = D_e \sin(\theta)$$
$$= 4 \times \sin(30.31) = 2.02 \text{ m}$$

مثال ٢ -٥ خط نقل هوائي له البيانات الآتية:

المسافة بين البرجين	٢٧٥ m
قطر الموصل	١٩,٥ mm
وزن الموصل	٠,٨٥ kg/m
الشد في الموصل	٤٠٠٠ kg

احسب الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي إذا كان الخط معرضا لضغط رياح مقداره ٣٩ kg/m² وكان سمك طبقة الثلوج المتراكمة على الموصل ١٣ mm ، كثافة الثلج ٩١٠ kg/m.

الحل

القطر الخارجي للموصل(d_o) في وجود طبقة الثلج :

$$d_o = d + 2t = 19.5 + 2 \times 13 = 45.5 \text{ mm}$$

المساحة المسقطة لكل ١ متر من طول الموصل

$$A_p = d_o \times 1 = 45.5 \times 10^{-3} \times 1 = 0.0455\ m^2$$

قوة ضغط الرياح لكل ١ متر

$$w_w = A_p \times P = 0.0455 \times 39 = 1.77\ kg/m$$

وزن الثلوج لكل متر

$$\begin{aligned} w_i &= \pi.\rho.(d+t).t \\ &= \pi \times 910 \times (19.5 + 13) \times 13 \times 10^{-6} \\ &= 1.207 \quad kg/m \end{aligned}$$

الوزن المحصل للموصل

$$\begin{aligned} w_e &= \sqrt{(w_c + w_i)^2 + w_w^2} \\ &= \sqrt{(0.85 + 1.207)^2 + (1.77)^2} = 2.714\ kg/m \end{aligned}$$

الترخيم

$$\begin{aligned} D_e &= \frac{w_e L^2}{8T} \\ &= \frac{2.714 \times (275)^2}{8 \times 4000} = 6.4\ m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{w_w}{w_c + w_i}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{1.77}{0.85 + 1.207}\right) = 40.71^\circ \end{aligned}$$

نحسب الترخيم الرأسي:

$$\begin{aligned} D &= D_e \cos(\theta) \\ &= 6.4 \times \cos(40.71) = 4.85\ m \end{aligned}$$

والالتواء الأفقي:

$$\begin{aligned} D_h &= D_e \sin(\theta) \\ &= 6.4 \times \sin(40.71) = 4.17\ m \end{aligned}$$

٢ -٥ -٣. حساب الترخيم بين برجين مختلفي الارتفاع

في أحيان كثيرة تكون نقاط تعليق الموصل ليست على نفس مستوى الارتفاع لاختلاف ارتفاع البرجين كما يحدث عند عبور خط النقل لمجرى مائي أو عند الاضطرار إلى أن تكون المسافة بين برجين أكبر بكثير من الباع المتوسط فيلزم زيادة ارتفاع البرجين اللذين يثبتان الموصل خلال هذه المسافة الكبيرة عن ارتفاع الأبراج العادي، وتحدث هذه الحالة أيضا عند مرور خط النقل في منطقة جبلية أو هضابية حتى وإن كانت الأبراج لها نفس الارتفاع فإن اختلاف منسوب سطح الأرض يتسبب في أن تكون الأبراج ليست على مستوى واحد مما يجعل نقاط تثبيت الموصل على البرجين ليست على نفس المستوى كما لو كانت الأبراج مختلفة الارتفاع.

وعندما تكون نقطتيا تثبيت الموصل ليستا على نفس الارتفاع فإن النقطة التي يحدث عندها أقصى ترخيم لا تكون في منتصف المسافة بين البرجين وإنما تكون أقرب إلى البرج الأقل ارتفاعا، ولإيجاد الترخيم في هذه الحالة نفرض أن النقطة التي يحدث عندها أقصى ترخيم تبعد عن البرج الأقل ارتفاعا مسافة x وحيث إن المسافة بين البرجين هي L فإن نقطة أقصى ترخيم تبعد مسافة $L-x$ عن البرج الأكبر ارتفاعا، شكل ٢ -١٣.

وبفرض أن: D_1 = الترخيم محسوبا بالنسبة للبرج القصير

D_2 = الترخيم محسوبا بالنسبة للبرج الطويل

فإن:

$$D_2 = D_1 + h$$

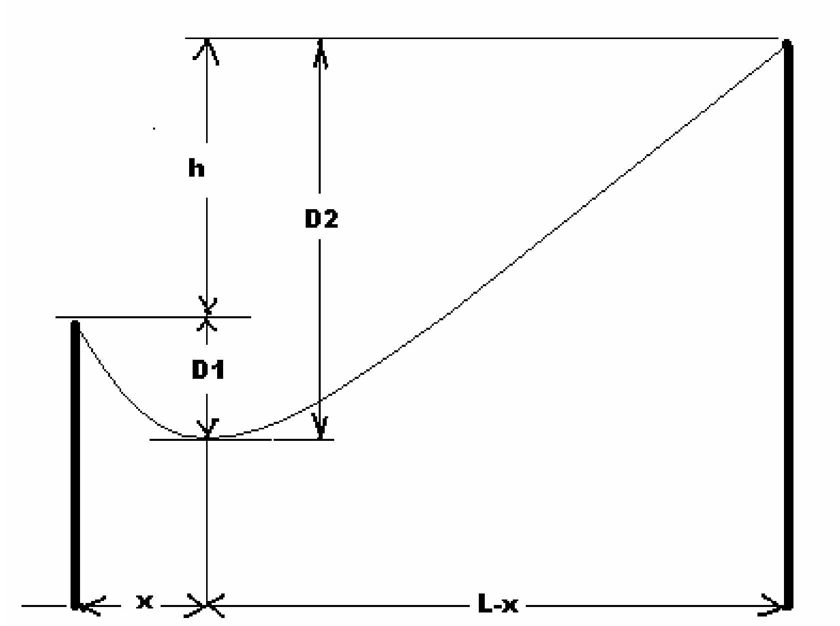
حيث h هو الفرق بين ارتفاعي البرجين

وحيث إن:

$$D_1 = \frac{w_c \cdot x^2}{2T}, \qquad D_2 = \frac{w_c \cdot (L-x)^2}{2T}$$

فإن:

$$\frac{w_c \cdot (L-x)^2}{2T} = \frac{w_c \cdot x^2}{2T} + h$$



شكل ٢ -١٣ الترخيم بين برجين مختلفي الارتفاع

ومنها يمكن حساب قيمة x كما يلي:

$$x = \frac{L}{2} - \frac{Th}{w_c L} \qquad (٢,١٤)$$

والمعادلة (٢,١٤) تحدد بعد النقطة التي يحدث عندها أقصى ترخيم عن البرج القصير، فإذا كانت $x>0$ نحسب الترخيم D_1 مقاسا من البرج القصير باستخدام معادلة الترخيم المعروفة:

$$D_1 = \frac{w_c \cdot X^2}{2T}$$

ويكون الخلوص بين الموصل و الأرض في هذه الحالة مساويا الفرق بين ارتفاع البرج القصير والترخيم.

أما إذا كانت $X \leq 0$ فهذا يعني أن أقل انخفاض للسلك هو ارتفاع البرج القصير ويكون الخلوص بين الموصل والأرض هو ارتفاع البرج القصير

مثال ٢ -٦

خط نقل مثبت بين برجين ارتفاعهما ٤٥ متر ، ٣٠ متر والمسافة بينهما ٣٠٠ متر. فإذا كان وزن الموصل هو ١كجم/متر والشد في الموصل ٢٠٠٠ كجم، احسب الخلوص بين الموصل والأرض

الحل

الفرق بين ارتفاع البرجين

$$h = 45 - 30 = 15\ \text{m}$$

نحسب المسافة بين النقطة التي يحدث عندها أقصى ترخيم والبرج القصير

$$x = \frac{L}{2} - \frac{Th}{w_c L} = \frac{300}{2} - \frac{2000 \times 15}{1 \times 300}$$

$$= 150 - 100 = 50\ \text{m}$$

ويكون الترخيم محسوبا من البرج القصير

$$D_1 = \frac{w_c . x^2}{2T} = \frac{1 \times (50)^2}{2 \times 2000}$$

$$= \frac{2500}{4000} = 0.625\ \text{m}$$

الخلوص بين الموصل والأرض

$$C = 30 - 0.625 = 29.375\ \text{m}$$

مثال ٢ -٧

خط نقل معلق بين برجين ارتفاعهما ٢٥ متر ، ٣٥ متر والمسافة بينهما ٢٠٠ متر. فإذا كان والشد في الموصل ٢٠٠ كجم وزن الموصل ٢٥٠ كجم/كيلومتر ، احسب الخلوص بين الموصل والأرض

الحل

الفرق بين ارتفاع البرجين

$$h = 35 - 25 = 10\ \text{m}$$

وزن الموصل

$$w_C = \frac{250}{1000} = 0.25\ \text{kg/m}$$

المسافة بين نقطة أقصى ترخيم والبرج القصير

$$x = \frac{L}{2} - \frac{Th}{w_c L} = \frac{200}{2} - \frac{200 \times 10}{0.25 \times 200}$$

$$= 100 - 40 = 60 \text{ m}$$

الترخيم محسوبا من البرج القصير

$$D_1 = \frac{w_c . x^2}{2T} = \frac{0.25 \times (60)^2}{2 \times 200}$$

$$= \frac{900}{400} = 2.25 \text{ m}$$

الخلوص بين الموصل والأرض

$$C = 25 - 2.25 = 22.75 \text{ m}$$

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

شبكات كهربائية

الكابلات الكهربائية

الكابلات الكهربائية

٣

الجدارة :

الأهداف :

عندما تكمل هذا الفصل تكون :

١. ملما بأنواع الكابلات الكهربائية وطرق حساب عناصرها

٢.قد تعلمت استعمال الجداول لاختيار الكابلات وحساب خصائصها

٢. ملما بأنواع الأخطاء التي تحدث في الكابلات وأسبابها وكيفية تحديد أماكن حدوثها

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب :

الوسائل المساعدة :

١. استخدام التعليمات في هذا الفصل .

٢. صور وبيانات عن أنواع الكابلات المختلفة وكذلك عن الأجهزة الحديثة لتحديد أماكن الأخطاء في الكابلات

متطلبات الجدارة :

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

٣ -١. مقدمة

الكابلات الكهربائية هي إحدى الوسائل التي تستخدم لنقل وتوزيع الطاقة الكهربية وقد درسنا في الفصل السابق خطوط النقل الهوائية كوسيلة أخرى لنقل وتوزيع الطاقة الكهربية، والفارق الجوهري بين الخطوط الهوائية والكابلات هو أن الموصلات المستخدمة في الخطوط الهوائية تكون موصلات مكشوفة أي غير معزولة ويتم تثبيتها على أبراج للمحافظة على مسافات فاصلة ثابتة بين الموصلات بعضها البعض وبين الموصل والأرض، في حين أن الموصلات المستخدمة في الكابلات تكون مغطاة بأكملها بمادة عازلة - بالطبع ما عدا عند النهايات حيث التوصيلات بباقي أجزاء منظومة القوى - ويتم تمديد هذه الكابلات إما بالدفن المباشر في الأرض، أو داخل مواسير مدفونة في الأرض أو خلال مجار تحت سطح الأرض مهيأة خصيصا لهذا الغرض، أو تمدد محمولة على صواني (trays) سواء كانت هذه الصواني مفتوحة أو مغلقة. والكابلات بهذه الطريقة أكثر أمانا من الخطوط الهوائية حيث إن احتمالات تلامس الأفراد أو الطيور والزواحف والحيوانات الصغيرة أو الأجسام المعدنية مع الموصلات الحاملة للجهد الكهربي تكون ضئيلة جدا مما يحافظ على سلامة الأشخاص وأيضا تقليل فرص تعرض الكابل للأخطاء، أي أن الكابل أكثر أمانا من الخط الهوائي وهذه هي أهم مميزات الكابلات على خطوط النقل الهوائية.

والاختيار بين الكابلات الأرضية والخطوط الهوائية لا يتم وفقا لمعيار واحد ولكنه يخضع – إلى جانب اعتبارات الأمان - لعدة عوامل اقتصادية وفنية عديدة أهمها:

تكلفة الموصل: لنقل نفس القدرة يكون الموصل المستخدم في خط النقل أقل تكلفة من الموصل المستخدم في الكابل حيث إن السعة الأمبيرية للموصلات المكشوفة المستخدمة في خطوط النقل تكون أكبر بكثير من السعة الأمبيرية للموصل داخل الكابل وبالتالي يكون موصل خطوط النقل أصغر حجما وأقل تكلفة من موصل الكابل.

تكلفة العازل: تكلفة العازل في الكابل أكبر بكثير منها في حالة خط النقل الهوائي حيث إن خط النقل يستخدم موصلات مكشوفة مثبتة على أبراج ويتم عزل الموصلات عن جسم البرج باستخدام عوازل من البورسلين ويكون الهواء هو العازل الأساسي بين الموصلات وبعضها حيث يتم تثبيت الموصلات بعيدة عن بعضها البعض بمسافات تعتمد على مقدار الجهد، أما في الكابلات يتم إحاطة الموصل بمادة عازلة عالية التكلفة ويلزم غطاء معدني لحماية العازل من تأثيرات التربة وحماية ميكانيكية للكابل وفي بعض أنواع الكابلات وخصوصا التي تستخدم الورق العازل يلزم ملء الكابل بالزيت العازل أو غاز خامل

لملء الفراغات بين طبقات الورق وفي هذه الحالة يلزم تركيب خزانات للزيت أو الغاز الخامل على طول مسار الكابل مما يجعل تكلفة العزل أكبر بكثير للكابل منها في حالة خط النقل.

تكلفة التركيب: تكلفة تركيب خطوط النقل الهوائية أقل بكثير من تكلفة تركيب الكابل.

وبصفة عامة فإن تكلفة الكابلات أعلى بكثير جدا من تكلفة الخطوط الهوائية حيث قد تصل أحيانا إلى عشرة أضعاف أو يزيد تكلفة خط النقل.

بالإضافة إلى هذه العوامل الاقتصادية فإن هناك عامل يحد من استخدام الكابلات لنقل القدرة عند جهود عالية لمسافات طويلة حيث إنه في حالة الكابل تكون السعة capacitance أكبر تأثيرا من المحاثة inductance ويكون تيار الشحن كبيراً جداً مما يسبب ارتفاعاً كبيراً في الجهد ولذلك فإنه لنقل كمية كبيرة من القدرة لمسافات طويلة على جهود عالية لا يمكن استخدام الكابلات وإنما تستخدم الخطوط الهوائية.

وكما سبق أن أوضحنا أن الكابلات تتميز على الخطوط الهوائية بأنها أكثر أمانا للأفراد وأقل عرضة للحوادث وأقل تأثرا بالكوارث الطبيعية والعوامل البيئية ولذلك فهي تستخدم عندما يكون الأمان مطلبا أساسيا أو عندما يكون النقل بخطوط هوائية غير مأمون كما في الحالات التالية:

- داخل المنشآت الصناعية وداخل المدن والمناطق المأهولة بالسكان
- في الأماكن التي قد تتسبب خطوط النقل الهوائية فيها في حدوث أعطال أو حوادث كما هي الحال بالقرب من المطارات
- عبر الموانع المائية المتسعة
- داخل محطات القدرة ومحطات المحولات

٣_٢. تركيب الكابل

تتكون جميع أنواع الكابلات بصفة أساسية من موصل ذي مقاومة منخفضة لنقل التيار الكهربي ويسمى هذا الموصل عادة قلب الكابل (core) وعازل لعزل الموصلات عن بعضها وعن ما يحيط بها وعن الأرض، وفي بعض أنواع الكابلات - وخصوصا الكابلات المرنة التي تستخدم في التمديدات الكهربية - لا يحتوي الكابل أكثر من الموصل والعازل ولكن بصفة عامة كلما ارتفع الجهد الذي سيعمل عنده الكابل ازداد تركيبه تعقيدا. والمكونات الأخرى للكابل تشمل:

- ستارة من مادة موصلة (screening) للحصول على توزيع أفضل للمجال الكهربي داخل المادة العازلة
- مواد مالئة (حشو filler) وتستخدم لملء الفراغ بين القلوب في الكابلات متعددة القلوب

- غلاف معدني (metallic sheath) لمنع تسرب الرطوبة داخل الكابل وكذلك لاحتواء الغاز المضغوط أو الزيت العازل في الكابلات التي تستخدم مثل هذه الأوساط
- الدرع (armour) للحماية الميكانيكية للكابل
- الغطاء الخارجي لحماية الأجزاء المعدنية من التآكل
- وقد تحتوي بعض أنواع الكابلات على أنابيب داخلية أو خارجية للتخلص من الحرارة المتولدة نتيجة لفقد القدرة في الكابل

٣ -٣. أنواع الكابلات

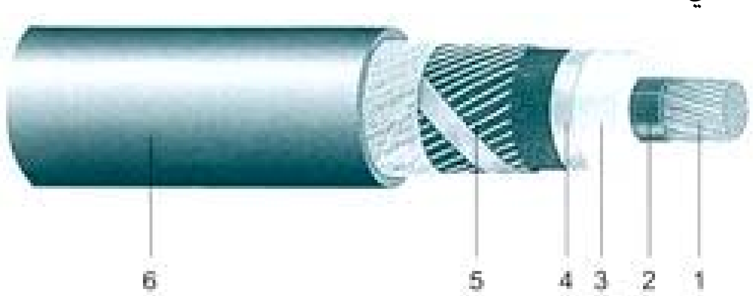
للكابلات أنواع عديدة ويمكن تصنيفها على أسس متعددة كعدد القلوب في الكابل الواحد ونوع المادة العازلة ومستوى الجهد الذي يعمل الكابل عنده وكذلك بالنسبة لمجال استخدامها. وفيما يلي سنستعرض أنواع الكابلات طبقا للتصنيفات المختلفة.

أولاً: بالنسبة لعدد القلوب في الكابل

يمكن تصنيف الكابلات إلى نوعين:

- الكابل ذي القلب الواحد single core cable
- الكابل متعدد القلوب multi-core cable

شكل (١,٣) يبين كابلاً ذا قلب واحد مشتملا على معظم المكونات التي ممكن أن توجد في مثل هذا الكابل، وهذه الأجزاء هي:



شكل (١,٣) كابل ذو قلب واحد

موصل مجدول

ستارة الموصل (الكربون أو مادة شبه موصلة)

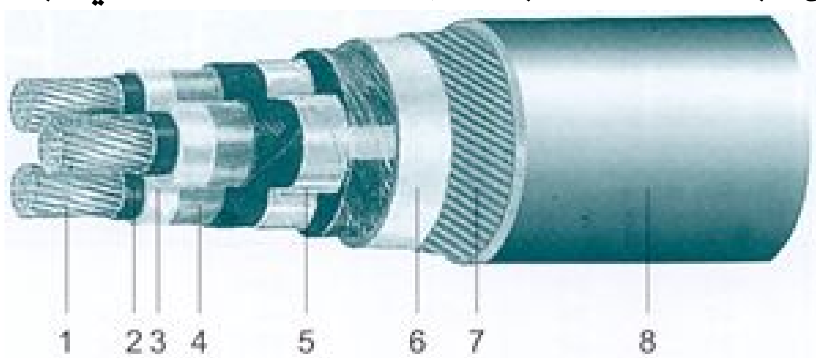
العازل الرئيسي للكابل

ستارة العازل : طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة

الغلاف المعدني : عبارة عن أسلاك نحاس ملفوفة بطريقة حلزونية حول الكابل ومن الممكن أن يكون شريط من الرصاص أو النحاس أو الألومونيوم

الغلاف الخارجي وعادة ما يكون من البولي فينيل كلورايد

والشكل (٢,٣) يوضح كابلاً ذا ثلاثة قلوب وبه معظم المكونات الممكن تواجدها في كابل



شكل (٢,٣) كابل ذو ثلاثة قلوب

وهذه الأجزاء هي:

١. موصل مجدول
٢. ستارة الموصل (الكربون أو مادة شبه موصلة)
٣. عازل: العازل الرئيسي لموصلات الكابل وقد يكون من الورق المشبع بالزيت أو المطاط، أو البولي إيثيلين، أو البولي فينيل كلورايد وغيرها)
٤. ستارة العازل : طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة
٥. ستارة العازل المعدنية : شريط نحاسي سمك ٠,١ مم
٦. حشو وبطانة: الحشو قد يكون من الجوت أو من أي مادة لدنة لملء الفراغ بين الموصلات والبطانة غالبا ما تكون من البولي فينيل كلورايد
٧. التسليح: وهو في الكابل الموضح عبارة عن أسلاك من الصلب المجلفن ولكن قد يكون أيضا في صورة شريط من الصلب المجلفن وقد يكون أيضا من أسلاك الألومونيوم
٨. الغلاف الخارجي وعادة ما يكون من البولي فينيل كلورايد

وجدير بالذكر هنا أنه ليس من الضروري أن تكون جميع الكابلات لها نفس التركيب بل يختلف تركيب الكابل تبعا لمستوى الجهد الذي يعمل عنده ونوع العازل المستخدم في الكابل وطريقة تركيب الكابل واستخدامه.

والمفاضلة بين كابلات القلب الواحد والكابلات عديدة القلوب يخضع لعوامل اقتصادية وتقنية كثيرة، فحين نجد أن الكابلات عديدة القلوب تكون أقل في التكلفة وتؤدي إلى استخدام اقتصادي أفضل لمجاري الكابلات فإن الكابل وحيد القلب يهيئ مرونة أفضل وسهولة في التركيب والتوصيل ولذلك يفضل استخدام الكابلات وحيدة القلب داخل المباني نظرا لكثرة تعرض الكابل للانحناءات وكذلك كثرة عمل التفريعات والتوصيلات على الكابل.

ثانيا : بالنسبة لنوع المادة العازلة المستخدمة

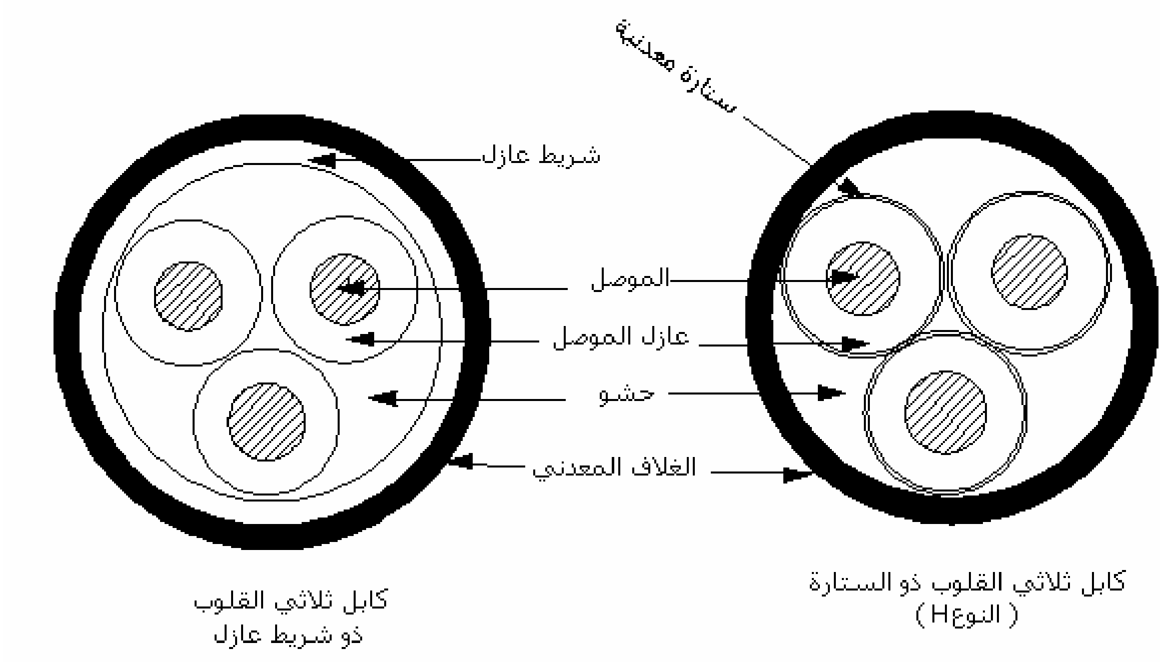
يتم تصنيف الكابلات طبقا لنوع المادة العازلة إلى:

كابلات العازل الورقي paper insulated cables

يتمتع العازل الورقي بخواص كهربية جيدة ولكن عمليات اللحام وتوصيل النهايات لكابل العازل الورقي تحتاج إلى خبرة ودقة في الأداء أعلى من تلك المطلوبة للكابلات التي تستخدم الأنواع الأخرى من العوازل، ويوجد أنواع كثيرة من الكابلات ذات العازل الورقي منها:

كابلات العازل الورقي المصمت

و هي التي لا تستخدم الزيت أو أي سائل أو غاز لمنع تكون الفقاعات الهوائية داخل العازل ولذلك يكون استخدامها محدودا للجهود الأقل من ٦٦ ك.ف. وتصنع الكابلات المصمتة إما بقلب واحد أو بثلاثة قلوب. و الكابل ذو الثلاثة قلوب قد يكون من النوع ذي الشريط "belted cable"حيث يتم عزل كل من الموصلات الثلاثة بالورق المشبع ثم تلف الموصلات المعزولة معا بشريط ورقي عازل ويملأ الفراغ الناشئ بحشو من أي مادة عازلة ثم يحاط الكابل بغلاف معدني واحد، ويستخدم الكابل ذو الشريط عند الجهود المنخفضة أما عند الجهود العالية يؤدي سوء توزيع المجال الكهربي داخل الكابل إلى انخفاض شدة الانهيار الكهربي للعازل، ولتحسين توزيع المجال الكهربي داخل الكابل يحاط العازل الخاص بكل موصل بستارة معدنية وتوصل الستارة المعدنية لكل موصل مع الغلاف المعدني للكابل والذي يوصل بالأرض، ويعرف هذا النوع بالكابل ذي الستارة أو الكابل من النوع H "H type cable" ويعتبر الكابل من النوع H من وجهة النظر الكهربية كما لو كان ثلاثة كابلات أحادية القلب منفصلة. شكل (٣,٣) يبين كلا من الكابل ذي الشريط و الكابل من النوع H.



شكل(٣،٣) الكابل ذو الشريط و الكابل من النوع H ذو الستارة

كابلات العازل الورقي المليئة بالزيت أو الغاز

تحت ضغط منخفض أو تحت ضغط مرتفع وفيها يستخدم الزيت العازل أو غاز النيتروجين الخامل للحد من تكون الفقاعات الهوائية داخل العازل الورقي وكذلك للتبريد وتستخدم هذه الكابلات عند جهود تصل إلى ٧٥٠ ك.ف.، ولا تستخدم هذه الكابلات إلا حين تكون هناك ضرورة قصوى لاستخدامها وذلك لارتفاع تكلفتها وتعقيد التركيبات الخاصة بها وخصوصا التجهيزات اللازمة لسريان الزيت أو الغاز.

كابلات العوازل البوليمرية Polymer insulated cables

المادة العازلة في هذه الكابلات تكون إحدى المواد البوليمرية المستخرجة من صناعات البتروكيماويات وأكثر هذه المواد شيوعا في الاستعمال هي:

١. البولي فينيل كلورايد PVC:

ويتميز بخواص كهربية ممتازة عند الجهود المنخفضة ودرجات الحرارة المنخفضة إلى جانب رخص الثمن مقارنة بالكابلات ذات العوازل الأخرى ولذلك تعتبر الكابلات المعزولة بمادة PVC هي الاختيار الأفضل في جميع أنحاء العالم حتى جهد ٣،٣ ك.ف إلا أنها غير مناسبة للجهود الأكبر من ذلك حيث ترتفع مفقودات العزل.

٢. البولي إيثيلين التشابكي **XLPE**:

وتتميز بمقاومة عالية للرطوبة وتحمل درجات حرارة مرتفعة نسبيا أثناء التحميل العادي وكذلك عند زيادة الحمل أو في حالات القصر، الفقد في العزل أصغر مقارنة بمعظم مواد العزل الأخرى وهي أصلد العوازل المعروفة ولذا لا يحتاج إلى تسليح إلا عند توقع تعرضه لإجهادات ميكانيكية عنيفة ولذلك تستخدم في الجهود الأعلى من ٣,٣ك ف وحتى ٢٧٥ ك ف وهذه الكابلات شائعة الاستعمال في منظومات التوزيع. ولأن XLPE أصلد العوازل المعروفة فإنه يجب مراعاة ذلك عند تركيب الكابل حيث إنه يكون غير مناسب لعمل انحناءات.

٣. العوازل المطاطية:

وأهمها مطاط الإيثيلين بروبلين EPR ومطاط البيتيل PR وتستعمل عند الحاجة لخواص معينة متوفرة فيهما، إلا أن الاتجاه العام هو تفضيل استخدام XLPE في الأحوال العادية

ثالثا: بالنسبة لمستوى الجهد

يتم تقسيم الكابلات إلى:

- **كابلات الجهد العالي والفائق high voltage cables**
- **كابلات الجهد المتوسط medium voltage cables**
- **كابلات الجهد العالي والفائق low voltage cables**

ولأنه لا توجد قيم محددة متفق عليها عالميا لحدود قيم الجهد لكل من هذه المستويات، فمثلا ما يعتبر جهدا متوسطا في المملكة يمكن اعتباره ضمن الجهد العالي في مكان آخر أو العكس، ولذلك يفضل تعريف الكابل بقيمة الجهد بين الموصل والأرض أثناء التشغيل (U_o) والجهد الذي تم تصميم الكابل عليه (U) وكل منهما يعطى بالقيمة الفعالة.

رابعا: أنواع الكابلات طبقا لاستخدامها

١. كابلات نقل وتوزيع القوى الكهربية:

وهى الكابلات التي تستخدم في منظومات القوى الكهربية بمستوياتها المختلفة والكابلات التي تعمل عند الجهود العالية أكبر من ٤٠ ك.ف تعرف بكابلات النقل ويغلب استعمال الكابلات ذات العازل الورقي عند الجهود العالية وإن كانت كابلات XLPE بدأت تجد طريقها للاستعمال عند جهود تصل حتى ٢٧٥ ك ف، وتعمل كابلات التوزيع على جهود تتراوح بين ١١ك ف وحتى ٣٣ ك.ف .وكما ذكرنا سابقا أن الكابلات البوليمرية وخصوصا XLPE هي الأكثر شيوعا في شبكات التوزيع وفي المملكة

حيث درجات الحرارة المرتفعة في معظم الأنحاء يكون لكابلات ميزة أخرى حيث إنها تتحمل درجات الحرارة العالية بالإضافة إلى سهولة تركيبها وتوصيلها وإصلاحها.

٢. كابلات التمديدات الكهربائية:

وتعرف أيضا بالكابلات المرنة حيث يكون الكابل مكونا من موصل مصنوع من النحاس الأحمر والعازل –الذي يكون غالبا من مادة PVC - لضمان مرونة الكابل حيث إنه يتعرض لكثير من الانحناءات ولسهولة تمديده داخل المواسير.

٣. الكابلات البحرية:

وتستخدم في نقل القدرة الكهربية عبر البحار ويتم تركيبها في قاع البحر أو المجرى المائي الذي تعبره.

٤. كابلات المنشآت الصناعية العامة:

وهي الكابلات المستخدمة لتغذية الطاقة داخل المنشآت الصناعية وتستخدم كابلات PVC بنجاح تام حتى جهد ٣,٣ك ف وبعض المنشآت تستخدم هذه الكابلات عند جهد ١١ ك ف وحتى ١٥ ك ف إلا أن الاتجاه السائد هو عدم استخدام كابلات لجهود أعلى من ٣,٣ ك ف نظرا لارتفاع السماحية له يزيد من الفقد في العازل ولذلك تستخدم كابلات XLPE , EPR للجهود ١١ك ف وأعلى

٥. كابلات المصانع الكيماوية وصناعة البتروكيماويات :

الكابلات المستخدمة في مثل هذه الصناعات تكون عرضة لتسرب المواد العضوية التي لها القدرة على اختراق العازل والوصول إلى قلب الكابل مما يتسبب في حدوث الحرائق ولذلك يجب عمل الحماية اللازمة للكابل باستعمال كابلات ذات غلاف أو كابلات عليها طبقة الحماية الخارجية المناسبة أوالطريقتين معا وذلك لمنع تسرب الزيوت والمواد الأخرى القابلة للاشتعال ووصولها إلى الكابل.

٣ -٤. حساب معاملات الكابل

يتحدد أداء الكابل بمجموعة من العوامل التي يجب أن تحدد بدقة للحكم على ما إذا الكابل مناسبا للمهمة المزمع استخدامه لها أم لا ، وهذه العوامل تشمل مقدار الفقد في القدرة الحادث في الكابل، الهبوط في الجهد على الكابل، وتيار الشحن للكابل.

والفقد في القدرة يلزم حسابه ليس فقط للحكم على جودة أو كفاءة الكابل ولكن أيضا لتحديد السعة الأمبيرية له حيث إن هذا الفقد يتحول إلى حرارة تؤدي إلى تسخين الكابل وارتفاع درجة حرارته والتي يجب التأكد من أنها لن تتعدى الحدود المسموح بها حتى لا يتأثر العازل، ولحساب هذا الفقد يلزم حساب مقاومة الموصل وكذلك مقاومة العازل. و يلزم حساب الهبوط في الجهد على الكابل لتحديد ما إذا كان الجهد عند أطراف الحمل الذي يغذيه الكابل داخل نطاق الحدود المسموح بها

لتنظيم الجهد أم لا ، و يتحدد الهبوط في الجهد بحاصل ضرب معاوقة الكابل والتيار المار فيه ولذا يلزم تحديد معاوقة الكابل بشقيها المقاومة والمفاعلة الحثية inductive reactance. ويتحدد تيار شحن الكابل بمقدار الجهد والسعة capacitance للكابل. و على هذا فإنه لحساب أداء الكابل يلزم حساب المعاملات الآتية له:

- مقاومة الموصل **conductor resistance**
- مقاومة العازل**insulation resistance**
- المحاثة **inductance**
- السعة **capacitance**

ومعظم هذه المعاملات يمكن الحصول عليها من النشرات الفنية التي تصدرها الشركات المنتجة للكابلات ولكن فيما يلي سنعرض الأساس العلمي لكيفية حساب هذه المعاملات وكيفية حساب أداء الكابل باستخدام هذه المعاملات ثم بعدها نوضح كيفية استخدام الجداول لحساب هذه المعاملات.

٩. ٢ -٤ -١. مقاومة الموصل

يعتمد مقدار مقاومة الموصل (R) على نوع مادة الموصل – مُمَثلة بالمقاومة النوعية للمادة أو المقاومية ρ أوم.متر - ومساحة مقطعه (A متر٢) وطوله (ℓ متر) وتُحسب المقاومة باستخدام العلاقة المعروفة:

$$R = \frac{\rho.\ell}{A} \qquad (٣,١)$$

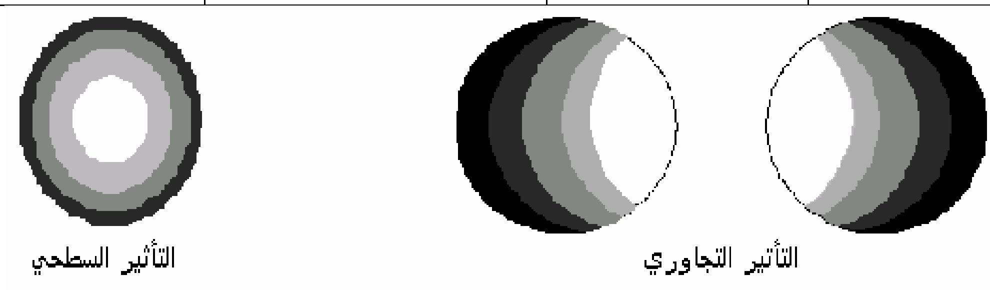
وتتغير مقاومية المادة بتغير درجة الحرارة ولذلك لا يكون كافيا تعريف مقاومية مادة ما دون تحديد لدرجة الحرارة التي قيست عندها هذه المقاومية ولذلك اصطلح على اعتبار درجة الحرارة ٢٠°م قيمة قياسية لتعريف مقاومة المواد المختلفة، وإذا أريد حساب المقاومة عند درجة حرارة أخرى -كما هو الحال في الكابلات حيث تعمل الكابلات عند درجات حرارة تتراوح من ٧٠°م إلى ٩٠°م - يجري تصحيح قيمة المقاومة باستخدام العلاقة التالية:

$$R_t = R_{20}(1+\alpha_{20}(t-20)) \qquad (٣,٢)$$

حيث R_t هي المقاومة عند درجة حرارة t و $R_{٢٠}$ هي المقاومة عند درجة ٢٠°م، $\alpha_{٢٠}$ هو المعامل الحراري للمقاومة عند ٢٠°م. والجدول (١,٣) يوضح المقاومية والمعامل الحراري للمقاومة لبعض المواد المستخدمة في صناعة الكابلات.

جدول (١،٣) الخواص الكهربية لبعض المواد المستخدمة في صناعة الكابلات

المعدن	الموصلية النسبية (النحاس ١٠٠٪)	المقاومية عند ٢٠^{o} م أوم.متر	المعامل الحراري للمقاومة عند ٢٠^{o} م
النحاس المخمر	١٠٠	١،٧٢٤×١٠$^{-٨}$	٠،٠٠٣٩
النحاس الصلد	٩٧	١،٧٧٧×١٠$^{-٨}$	٠،٠٠٣٩
النحاس المقصدر	٩٥ - ٩٩	(١،٧٤١ - ١،٨١٤)×١٠$^{-٨}$	٠،٠٠٣٩
الألومنيوم	٦١	٢،٨٠٣×١٠$^{-٨}$	٠،٠٠٤٠
الصلب الطري	١٢	١٣،٨٠×١٠$^{-٨}$	٠،٠٠٤٥
الرصاص	٨	٢١،٤× ١٠$^{-٨}$	٠،٠٠٤٠



شكل(٤،٣) توزيع التيار في الموصل نتيجة للتأثير السطحي والتأثير التجاوري

وبالإضافة إلى زيادة مقاومة موصلات الكابلات نتيجة لارتفاع درجة الحرارة فهناك زيادة أخرى في مقاومة الكابلات المستخدمة في دوائر التيار المتردد نتيجة لظاهرتين هما ظاهرة التأثير السطحي و ظاهرة التأثير التجاوري، شكل (٤،٣) يوضح كيفية توزيع التيار على مقطع الموصل نتيجة لكل من التأثير السطحي والتأثير التجاوري. في هذا الشكل اللون الأسود يمثل أعلى كثافة للتيار واللون الأبيض يعنى أدنى كثافة و تتدرج كثافة التيار مع درجات الرمادي، جدير بالإشارة هنا أن هذا الرسم للتوضيح فقط وما يحدث أن كثافة التيار تتغير تغييرا تدريجيا لا يمكن معه ملاحظة الفوارق بين المناطق المختلفة بالتحديد الموجود في الرسم.

كما هو واضح من الشكل فإنه نتيجة للتأثير السطحي يتجه التيار إلى المرور في الحواف الخارجية للموصل تاركا المساحة القريبة من مركز الموصل مما يقلل من المساحة الفعلية للموصل،

وكذلك نتيجة لتواجد موصلات الكابلات قريبة من بعضها سواء كانت موصلات داخل نفس الكابل أو موصلات كابلات مختلفة موضوعة في نفس المجري يتجه التيار في كل موصل للسريان في الجانب البعيد عن الموصل الآخر مما يقلل أيضا من المساحة الفعلية للموصل. وتأثير هذه العوامل يعطى في

صورة جداول تحدد مقدار الزيادة في المقاومة عند الترددات المختلفة وفي مختلف أوضاع تركيب الكابلات وسوف نوضح استعمال هذه الجداول عند عرض حساب السعة الأمبيرية للكابل.

مثال ٣ -١

احسب مقاومة الموصل لكابل تيار مستمر طوله ١,٥ كيلومتر ومساحة مقطع موصله المصنوع من النحاس المخمر هي ١٨٥ مم٢، إذا كانت درجة حرارة الموصل هي ٩٠°م.

الحـــــــل

من الجدول ١,٣ نجد أنه للنحاس المخمر $\rho_{20} = 1.724 \times 10^{-8}$ ohm. M و $\alpha_{20} = 0.0039/°c$

طول الكابل = ١,٥ ×١٠٠٠ = ١٥٠٠ متر

مساحة مقطع الموصل = ١٨٥ مم٢ = ١٨٥×١٠^-٦ م٢

نحسب المقاومة عند ٢٠°م :

$$R_{20} = \frac{\rho_{20} \cdot \ell}{A} = \frac{1.724 \times 10^{-8} \times 1500}{185 \times 10^{-6}}$$
$$= 0.13978 \ \Omega$$

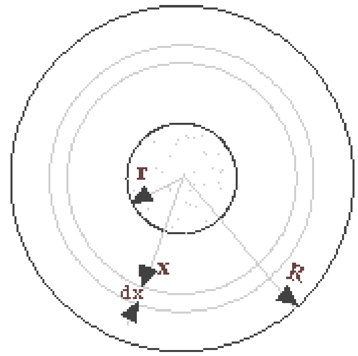
نحسب المقاومة عند ٩٠°م :

$$R_{90} = R_{20}(1 + \alpha_{20}(90 - 20)) = 0.13978\,(1 + 0.0039 \times 70)$$
$$= 0.17794\,\Omega$$

٢ -٤ -٢ سعة الكابل

تنشأ السعة بصفة عامة بين أي موصلين يفصلهما عن بعضهما عازل وهذا هو الوضع داخل الكابل حيث الموصل والغلاف المعدني يفصلهما العازل والسعة في الكابل أكبر تأثيرا منها في أي من عناصر منظومة القوى الأخرى وأكبر وأوضح تأثيرا من محاثة الكابل، ولذا فهي من أهم المعاملات التي يجب حسابها للكابل. والسعة هي النسبة بين الشحنة والجهد ولذلك سنبدأ بفرض أن الشحنة على كل متر من طول الكابل تساوي q وباستخدام قوانين المجال الكهروستاتيكي نوجد قيمة الجهد V بدلالة q ومن ثم نحسب السعة.

الشكل ٣ -٥ يبين مقطعا في كابل أحادي القلب حيث نصف قطر الموصل r ونصف القطر الداخلي للغلاف R. وإذا اعتبرنا نقطة داخل العازل وتبعد مسافة x عن مركز الكابل فإن وجود الشحنة q على الموصل ينشئ فيضا كهربيا عند هذه النقطة كثافته D حيث:



شكل (٣-٥) مقطع في كابل وحيد القلب

$$D = \frac{q}{2\pi x} \quad \text{coulomb/m}^2 \qquad (٣,٣)$$

وتكون شدة المجال الكهربي عند هذه النقطة:

$$E = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{q}{2\pi x\varepsilon} \quad \text{Volt/m} \qquad (٣,٤)$$

ويمكن حساب فرق الجهد بين الموصل والغلاف المعدني كالآتي:

$$V = \int_R^r -E.dx = \int_R^r -\frac{q}{2\pi\varepsilon x}.dx = \frac{q}{2\pi\varepsilon}\ln\frac{R}{r} \quad \text{volts} \qquad (٣,٥)$$

وبذلك تكون السعة C هي:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\frac{R}{r}} \qquad (٣,٦)$$

وبوضع $=\frac{\varepsilon_r}{36\pi}\times 10^{-9}$ $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ وعمل الاختصارات اللازمة ينتج أن:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18\times 10^9 \times \ln\frac{R}{r}} \quad \text{F/m} \qquad (٣,٧)$$

حيث ε_r هو معامل السماحية النسبية لمادة العازل المستخدم في الكابل

٣ -٤ -٣. حساب شدة المجال الكهربي داخل الكابل

المادة العازلة المستخدمة في صناعة الكابل لها كأي مادة عازلة أخرى قيمة قصوى لشدة المجال الكهربي التي يمكنها تحملها وتعرف هذه القيمة بالمتانة الكهربية للعازل ويجب أن لا تتعدى شدة المجال الكهربي داخل العازل هذه القيمة و إلا ينهار العازل مسببا قصر بين الموصل والغلاف المعدني للكابل، وفي الواقع يتم تصميم العازل بحيث تكون أكبر قيمة متوقعة لشدة المجال الكهربي فيه أقل

بنسبة معقولة عن متانته الكهربية. وواضح أن المعادلة (٣،٤) تمثل العلاقة بين شدة المجال الكهربي داخل الكابل والشحنة على الموصل ولكن هذه المعادلة لا يتم استخدامها عمليا في حساب شدة المجال حيث إن الكابل يتم تصميمه على أساس جهد التشغيل الذي سيعمل عليه وليس على أساس الشحنة. ولذلك يلزم حساب شدة المجال الكهربي داخل الكابل بدلالة الجهد. وإذا عوضنا عن q في المعادلة () بقيمتها من المعادلة ()، نحصل على علاقة لحساب شدة المجال الكهربي عند أي نقطة داخل العازل وتبعد مسافة x عن مركز الكابل باستخدام جهد التشغيل للكابل U_o كالآتي:

$$E = \frac{U_o}{x.\ln\frac{R}{r}} \qquad (٣،٨)$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن أكبر قيمة لشدة المجال الكهربي(E_{max}) تحدث عندما تكون x أقل ما يمكن أي عند سطح الموصل (x = r) وأقل قيمة لشدة المجال (E_{min}) تحدث عند السطح الداخلي للغلاف المعدني (x = R)، أي أن:

$$E_{min} = \frac{U_o}{R.\ln\frac{R}{r}} \qquad , \qquad E_{max} = \frac{U_o}{r.\ln\frac{R}{r}} \qquad (٣،٩)$$

٣ -٤ -٤ حساب تيار الشحن للكابل

تيار الشحن للكابل هو التيار الذي يمر في العازل نتيجة لسعة الكابل ويحدث هذا فقط عندما يعمل الكابل على جهد متردد ويكون هذا التيار متقدما عن الجهد بمقدار ٩٠° وفي حالة زيادة هذا التيار بنسبة كبيرة قد يسبب ارتفاعا كبيرا في الجهد يتسبب في تلف أو أخطاء في مكونات المنظومة المتصلة بالكابل و يتم حساب تيار الشحن من العلاقة الآتية:

$$\mathbf{I_c = \omega C V} \quad Amperes \qquad (٣،٨)$$

حيث ω=٢ π f، f هو التردد (في المملكة التردد ٦٠ Hz)

مثال ٢،٣

احسب السعة وتيار الشحن لكل كيلومتر لكابل وحيد القلب إذا كان قطر الموصل ٥ سم والقطر الداخلي للغلاف المعدني ١٥ سم و معامل السماحية النسبية للعازل ε_r=٣ و الكابل يعمل عند جهد متردد ١٣٢ ك ف والتردد ٦٠ هرتز. احسب كذلك أقصى قيمة وأدنى قيمة لشدة المجال الكهربي داخل الكابل.

الحـــــــــل

٢ =٢,٥ cm÷٢ =٧,٥ cm, r =٥÷R = ١٥

سعة الكابل:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18\times10^9\times\ln\frac{R}{r}} = \frac{3}{18\times10^9\times\ln\frac{7.5}{2.5}} = 0.152\times10^{-9}\ \text{F/m}$$

١٠□٦ F/km×C = ٠,١٥٢

تيار الشحن

$$I_c = \omega CV = ٢\pi f C V$$

١٣٢٠٠٠× ١٠□٦ × ٠,١٥٢× ٦٠ × = ٢ π

= ٧,٥٤٩ Ampere/km

عند حساب شدة المجال الكهربي تؤخذ القيمة الذروية للجهد وليست القيمة الفعالة

$$E_{max} = \frac{U_o}{r.\ln\frac{R}{r}} = \frac{132\sqrt{2}}{2.5\ln\frac{7.5}{2.5}} = 67.97\ \text{kV/cm},$$

$$E_{min} = \frac{U_o}{R.\ln\frac{R}{r}} = \frac{132\sqrt{2}}{7.5\ln\frac{7.5}{2.5}} = 22.66\ \text{kV/cm}$$

٣ -٥. الفقد في القدرة والسعة الأمبيرية

تتحدد السعة الأمبيرية للكابل بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الكابل بصفة مستمرة. عندما يمر تيار كهربي في الكابل فإن مقاومة الكابل تسبب فقدا في القدرة ، وبالإضافة إلى فقد القدرة الحادث في مقاومة موصل الكابل تحدث مفاقيد أخرى في كل من الغلاف المعدني نتيجة للتيارات الدوامية المتولدة فيه وكذلك في العازل نفسه نتيجة لموصلية مادة العازل. وهذا الفقد في القدرة يتحول إلى طاقة حرارية تؤدي إلى تسخين الكابل وارتفاع درجة حرارته إلى درجة يحدث عندها اتزان حراري حيث يتساوى معدل توليد الحرارة الناتج عن الفقد في القدرة مع معدل تسرب هذه الحرارة من الكابل. ويتأثر الارتفاع في درجة حرارة الموصل – وبالتالي درجة الاتزان الحراري والسعة الأمبيرية للكابل - بالعوامل الآتية:

١. تيار الموصل I
٢. مقاومة الموصل R

٣. الفقد في العازل Wd: وهو يساوي $\omega C U_o^2 \tan(\delta)$ وات/متر، حيث (δ) هي زاوية الفقد لمادة العازل المستخدم في الكابل و $\tan(\delta)$ يساوي النسبة بين مقاومة العازل وسعة الكابل.

٤. المقاومات الحرارية لأجزاء الكابل المختلفة وبين سطح الكابل والوسط المحيط به، والمقاومة الحرارية لجسم هي النسبة بين الفارق في درجات الحرارة بين سطحي الجسم وكمية الحرارة المنتقلة بين هذين السطحين ووحداتها هي كلفن.متر/وات ($^oK.m/W$)، وتعتمد المقاومة الحرارية على تركيب الكابل وطريقة تمديده. وأهم المقاومات الحرارية للكابل هي:

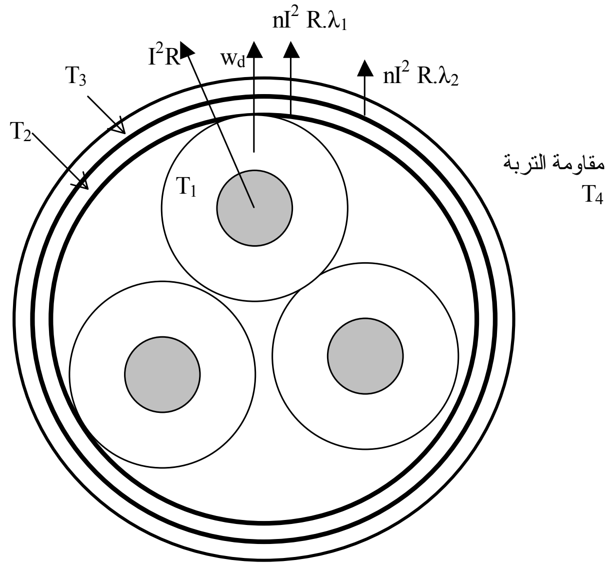
- المقاومة الحرارية بين الموصل والغلاف T_1
- المقاومة الحرارية للبطانة بين الغلاف المعدني والتسليح T_2
- المقاومة الحرارية للغلاف الخارجي T_3
- المقاومة الحرارية بين السطح الخارجي للكابل والوسط المحيط T_4

٥. عدد الموصلات الحاملة للتيار في الكابل n

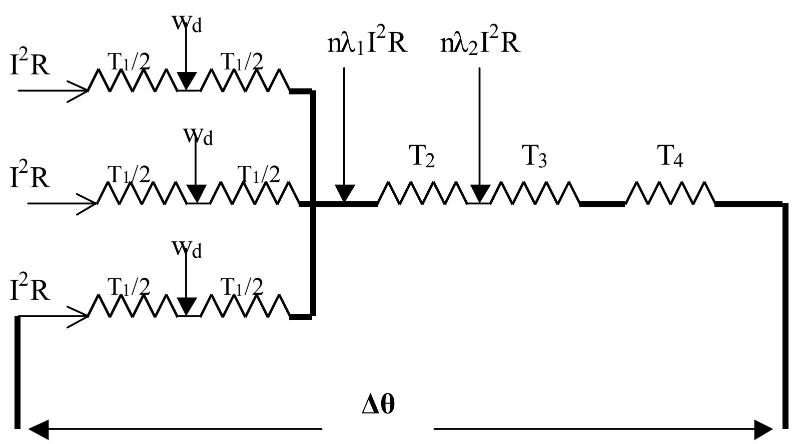
٦. النسبة بين الفقد في الغلاف المعدني والفقد في موصل الكابل λ_1

٧. النسبة بين الفقد في التسليح والفقد في موصل الكابل λ_2

وشكل ٣ -٦ يوضح مصادر الفقد في القدرة في الكابل وكذلك المقاومات الحرارية لأجزاء الكابل المختلفة. في هذا الشكل تم تركيز الفقد في العازل في منتصف سمك العازل وذلك لأن هذا الفقد موزع بانتظام على مقطع العازل ويكون تركيز الفقد الكلي في منتصف سمك العازل مكافئا للتأثير الحراري الفقد. ويمكن تمثيل سريان الحرارة من الكابل إلى الوسط المحيط بدائرة كهربية حيث تناظر درجة الحرارة الجهد في حين تكون الطاقة الحرارية السارية من الكابل إلى الوسط المحيط مناظرة للتيار كما في شكل ٣ - ٧.



شكل ٣ -٦ الفقد في القدرة والمقاومات الحرارية في الكابل



شكل٣ -٧ الدائرة المكافئة للعلاقة بين الطاقة المفقودة في الكابل والارتفاع في درجة الحرارة

وبتطبيق قوانين الدوائر الكهربية على الدائرة في شكل ٣ - ٧ يمكن حساب مقدار الارتفاع في درجة حرارة الموصل $(\Delta\theta)$ كالآتي:

$$\Delta\theta = (I^2R + 0.5w_d).T_1 + (I^2R(1+\lambda_1) + w_d)nT_2 + (I^2R(1+\lambda_1+\lambda_2) + w_d)n(T_3 + T_4)$$

ومنها يمكن حساب السعة الأمبيرية للكابل كالآتي:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - w_d\,[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)} \right\}^{1/2}$$

وقيمة $\Delta\theta$ هنا هي الفرق بين درجة حرارة الكابل ودرجة حرارة الجو المحيط أي أن السعة الأمبيرية للكابل تعتمد أيضا على درجة حرارة الجو بمعنى أن نفس الكابل إذا استخدم في الباحة أو أبها مثلا تختلف عنها إذا استخدم في الرياض، وحتى نفس الكابل في نفس المكان تختلف قدرته على حمل التيار صيفا عنها في الشتاء. كما تعتمد السعة الأمبيرية للكابل على طريقة تمديده، فالسعة الأمبيرية للكابل الموضوع في الهواء تختلف عن السعة الأمبيرية لنظيره الموضوع في مجارى أو مواسير أو المدفون في الأرض وتعتمد كذلك على نوعية التربة المدفون فيها الكابل. وتعتمد السعة الأمبيرية للكابل أيضا على ما إذا كانت هناك كابلات أخرى قريبة منه أم لا وعلى عدد الكابلات الموضوعة بالقرب منه حال وجودها. وعموما فإن حساب قيمة الارتفاع في درجة الحرارة وتحديد السعة الأمبيرية للكابل عملية شاقة ولا تتم عادة إلا في مصانع الكابلات نفسها، وتعطي مصانع الكابلات جداول بها السعة الأمبيرية أوقدرة حمل التيار للكابلات المختلفة عند ظروف تشغيل قياسية. ولأن ظروف التشغيل الواقعية تختلف عن الظروف القياسية فإنه يتم تزويد هذه الجداول بملاحق خاصة لتصحيح السعة الأمبيرية تبعا للظروف الواقعية وذلك بضرب القيمة المناظرة للحالة القياسية في معامل التقنين المناظر للظروف الواقعية التي يعمل عندها الكابل. وفيما يلي سنتعرف على كيفية استعمال هذه الجداول في تحديد السعة الأمبيرية للكابل.

٣ -٦. استخدام الجداول لحساب السعة الأمبيرية للكابلات

كما ذكرنا سابقا فإن مصانع الكابلات تعطي جداول بالسعة الأمبيرية للكابلات في ظروف قياسية معرفة بالمواصفات القياسية العالمية للكابلات في مختلف أوضاع تركيبها كما يلي:

٣ -٦ -١. الكابلات الموضوعة في الهواء

الظروف القياسية للكابلات الموضوعة في الهواء

١. درجة حرارة الجو المحيط ٢٥° مئوية لكابلات التوزيع والنقل و ٣٠° مئوية للكابلات داخل المباني
٢. أقل مسافة بين الكابل والحائط هي ٢٠ مم
٣. المسافة بين أقرب كابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٥٠ سم

٤. الكابل معزول عن ضوء الشمس المباشر

والجدول ٣ - ٢ يعطي معاملات التقنين للتصحيح من ٢٥° مئوية إلى درجات الحرارة الأخرى لأنواع مختلفة من الكابلات.

جدول ٣ -٢ معاملات التقنين لدرجة حرارة الوسط

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الهواء المحيط °م						
		٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥	٥٠	٥٥
ورق	٦٥	١	٠,٩٣	٠,٨٥	٠,٧٧	٠,٦٨	٠,٥٨	٠,٤٧
ورق	٨٠	١	٠,٩٤	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٢	٠,٦٥
PVC	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٤	٠,٥٥
XLPE	٩٠	١	٠,٩٥	٠,٩١	٠,٨٦	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٦٩

وسنوضح كيفية تحديد السعة الأمبيرية لكابل XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت في ظروف مختلفة باستخدام السعة الأمبيرية له في الظروف القياسية والمعطاة بجدول ٣ -٣ ومعاملات التقنين الموضحة بجدول ٣ -٢.

مثال ٣ -٣.:

احسب السعة الأمبيرية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت ذات موصل نحاس واحد مساحة مقطعها ١٨٥ مم² و مرتبة في وضع مسطح في الهواء الجوي إذا كانت درجة حرارة الجو ٤٠ °م

الحل:

من جدول ٣ -٣ نجد أن السعة الأمبيرية للكابل XLPE وحيد القلب المرتب في وضع مسطح ومساحة مقطعه ١٨٥ مم² هي ٦٠٠ أمبير (القيمة المظللة بالجدول)، وهذه القيمة تمثل السعة الأمبيرية للكابل عندما تكون درجة حرارة الجو ٢٥°م.

ولتصحيح السعة الأمبيرية للكابل، نوجد معامل التقنين من جدول ٣ -٢ للكابل XLPE عند ٤٠ °م.

معامل التقنين = ٠,٨٦

السعة الأمبيرية عند ٤٠ °م = السعة الأمبيرية عند ٤٠ °م × معامل التقنين

= ٦٠٠ × ٠,٨٦

= ٥١٦ أمبير

جدول ٣ -٣ السعة الأمبيرية لكابلات XLPE ٦٠٠/١٠٠٠ فولت

مساحة مقطع الموصل مم[٢]	في الهواء				في الأرض			
	قلب واحد		قلبان	٣ أو ٤ قلوب	قلب واحد		قلبان	٣ أو ٤ قلوب
	مثلثي*	مسطح†			مثلثي	مسطح		
موصلات النحاس								
١٦			١٢٠	١٠٥			١٤٠	١١٥
٢٥			١٦٠	١٤٠			١٨٠	١٥٠
٣٥			٢٠٠	١٧٠			٢١٥	١٨٠
٥٠	٢٣٥	٢٧٥	٢٤٠	٢٠٥	٢٣٥	٢٤٥	٢٥٥	٢١٥
٧٠	٣٠٠	٣٤٥	٣٠٠	٢٦٠	٢٩٠	٣٠٠	٣١٥	٢٦٥
٩٥	٣٦٥	٤٢٠	٣٧٥	٣٢٠	٣٤٥	٣٥٥	٣٨٠	٣١٥
١٢٠	٤٢٥	٤٨٥	٤٣٠	٣٧٠	٣٩٠	٤٠٠	٤٣٠	٣٦٠
١٥٠	٤٨٥	٥٤٠	٤٩٠	٤٣٠	٤٣٥	٤٤٠	٤٨٠	٤٠٥
١٨٥	٥٦٠	٦٠٠	٥٧٠	٤٩٠	٤٩٠	٤٨٥	٥٤٠	٤٦٠
٢٤٠	٦٦٠	٧٠٠	٦٧٠	٥٨٠	٥٦٠	٥٥٠	٦٣٠	٥٣٠
٣٠٠	٧٥٠	٧٨٠	٧٧٠	٦٦٠	٦٣٠	٦١٠	٧٠٠	٥٩٠
٤٠٠	٨٦٠	٨٤٠			٧٠٠	٦٤٠		
٥٠٠	٩٦٠	٩١٠			٧٧٠	٦٩٠		
٦٣٠	١٠٨٠	٩٨٠			٨٤٠	٧٤٠		
موصلات الألومونيوم								
١٦			٨٩	٧٧			١٠٥	٨٩
٢٥			١٢٠	١٠٥			١٣٥	١١٥
٣٥			١٤٥	١٢٥			١٦٥	١٣٥
٥٠	١٧٠	٢٠٠	١٧٥	١٥٥	١٧٥	١٨٥	١٩٥	١٦٥
٧٠	٢١٥	٢٥٥	٢٢٠	١٩٥	٢٢٠	٢٣٠	٢٤٠	٢٠٠
٩٥	٢٦٥	٣١٥	٢٧٠	٢٣٥	٢٦٠	٢٧٠	٢٨٥	٢٤٠
١٢٠	٣١٠	٣٦٥		٢٨٠	٢٩٥	٣١٠		٢٧٥
١٥٠	٣٥٥	٤١٥		٣٢٠	٣٣٠	٣٤٥		٣١٠
١٨٥	٤١٠	٤٧٥		٣٧٠	٣٧٥	٣٩٠		٣٥٠
٢٤٠	٤٩٥	٥٥٠		٤٤٠	٤٣٥	٤٤٥		٤١٠
٣٠٠	٥٧٠	٦٣٠		٥٧٠	٤٩٠	٤٩٥		٤٦٠

* مثلثي : ترتيب الكابلات على الشكل ⚬⚬⚬

† مسطح : ترتيب الكابلات على الشكل ○○○

٣ -٦ -٢.الكابلات المدفونة مباشرة في الأرض

الظروف القياسية لهذه الكابلات كما يلي:

١. درجة حرارة الأرض ١٥° مئوية
٢. المقاومية الحرارية للتربة ١,٢ كلفن.متر/وات
٣. المسافة بين الكابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٨٠ سم.
٤. عمق الدفن ٥٠ سم لكابلات ١ك ف، ٨٠ سم لأعلى من ١ ك ف

وأي اختلاف بين الظروف الفعلية التي يتعرض لها الكابل وهذه الظروف القياسية يلزم تصحيح السعة الأمبيرية للكابل، ولهذا الغرض توجد جداول لمعاملات التقنين لأي تغيير في أي من هذه الظروف، والجداول التالية ٣ -٤ إلى ٣ -٧ تعطي معاملات التقنين للحالات المختلفة.

جدول ٣ -٤ معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الأرض °م						
		١٠	٢٠	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥
ورق	٦٥	١,٠٥	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧١	٠,٦٣
ورق	٧٥	١,٠٤	٠,٩٦	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٨٣	٠,٧٨	٠,٧٣
PVC	٧٠	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤	٠,٦٧
XLPE	٩٠	١,٠٣	٠,٩٧	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٨١	٠,٧٧

جدول ٣ -٥ معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

حجم الموصل(مم٢)	المقاومية الحرارية للتربة K.m/W						
	٠,٨	٠,٩	١,٠	١,٥	٢,٠	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد							
حتى ١٥٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩١	٠,٨١	٠,٧٣	٠,٦٧
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٧	١,١٢	١,٠٧	٠,٩٠	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٦
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٨	١,١٣	١,٠٨	٠,٩٠	٠,٧٩	٠,٧١	٠,٦٥
كابل عديد القلوب							
حتى ١٦	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٤
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,١٤	١,١٠	١,٠٧	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٦	٠,٧٠
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩٢	٠,٨٢	٠,٧٤	٠,٦٨

جدول ٣ -٦ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد الكابلات في المجموعة	المسافة بين مراكز الكابلات (متر)				
		تلامس	٠,١٥	٠,٣٠	٠,٤٥	٠,٦٠
١ / ٠,٦	٢	٠,٨١	٠,٨٧	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
	٣	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٩٠
	٤	٠,٦٣	٠,٧٤	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٨٩
	٥	٠,٥٩	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,٨٧
	٦	٠,٥٥	٠,٦٧	٠,٧٦	٠,٨٢	٠,٨٦
١,٩/ ٣,٣ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨١	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩٠	٠,٩٢
	٣	٠,٧٠	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٦
	٤	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٠	٠,٨٤
	٥	٠,٥٩	٠,٦٦	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨١
	٦	٠,٥٥	٠,٦٣	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠
٣٣/١٩	٢	٠,٨٠	٠,٨٣	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩١
	٣	٠,٧٠	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٤	٠,٦٤	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨	٠,٨٢
	٥	٠,٥٩	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٥	٠,٧٩
	٦	٠,٥٦	٠,٦٠	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨

والآن لبيان كيفية استعمال هذه الجداول لتحديد السعة الأمبيرية للكابل تبعا لظروف التركيب الخاصة به سنورد بعض الأمثلة ،

مثال ٣ -٤.:

أربعة كابلات XLPE جهد ٦٠٠/١٠٠٠ فولت ذات ٣ قلوب نحاسية مساحة مقطع كل منها ٣٠٠مم^{٢} مدفونة في الأرض على عمق ١,٥ متر، فإذا كانت المسافة بين مركز أي كابل ومركز الكابل المجاور له ٤٥ سم و درجة حرارة الأرض ٢٥^{o} م و المقاومية الحرارية للتربة ٢,٥ كلفن.متر/وات. احسب السعة الأمبيرية للكابل.

الحل

أولا: نوجد السعة الأمبيرية للكابل في الظروف القياسية

من جدول ٣ -٣ لكابل نحاسي ذي ٣ قلوب ومساحة مقطعه ٣٠٠مم^{٢} نجد أن السعة الأمبيرية هي ٥٩٠ أمبير (القيمة التي تحتها خط في جدول ٣ -٣)

ثانيا: نقارن الظروف الفعلية للكابل بالظروف القياسية فإذا كانت متماثلة يكون معامل التقنين =١ وإلا نوجد معامل التقنين للظروف المختلفة عن الظروف القياسية

١. درجة حرارة الأرض ٢٥^{o} م وهي مختلفة عن درجة الحرارة القياسية ١٥^{o} م، وبالتالي يجب إيجاد معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض، من جدول ٣ -٤ نجد أنه للكابل XLPE عند ٢٥^{o} م يكون:
معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = ٠,٩٣

٢. المقاومية الحرارية للتربة ٢,٥ كلفن.متر/وات وهي مختلفة عن القيمة القياسية ١,٢ كلفن.متر/وات ، وبالتالي يجب إيجاد معامل التقنين لمقاومية التربة، من جدول ٣ -٥ نجد أنه للكابل متعدد القلوب والذي تقع مساحة مقطعه بين ١٨٥ و ٤٠٠ مم^{٢} (مساحة مقطع الكابل ٣٠٠ مم^{٢} تقع داخل هذا النطاق) عند مقاومية حرارية للتربة مقدارها ٢,٥ كلفن.متر/وات يكون:
معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = ٠,٧٤

٣. المسافة بين الكابلين ٤٥ سم وهي أقل من القيمة القياسية ١٨٠ سم، وبالتالي يلزم إيجاد معامل التقنين التجميعي، من جدول ٣ -٦ نجد أنه لأربعة كابلات جهد ٦٠٠/١٠٠٠ فولت مدفونة في وضع مسطح على بعد ٤٥ سم من بعضها البعض يكون:
معامل التقنين التجميعى = ٠,٨٦

٤. عمق الدفن ١,٥ متر وهو أكبر من القيمة القياسية (٥٠ سم للكابلات جهد ١ ك ف)، ولذلك يلزم حساب معامل التقنين لعمق الدفن، ومن الجدول ٣ -٧ نجد أنه لكابل ٠,٦/١ ك ف مساحة مقطعه ٣٠٠ مم٢ مدفون على عمق ١,٥ متر يكون:
معامل التقنين لعمق الدفن = ٠,٩١

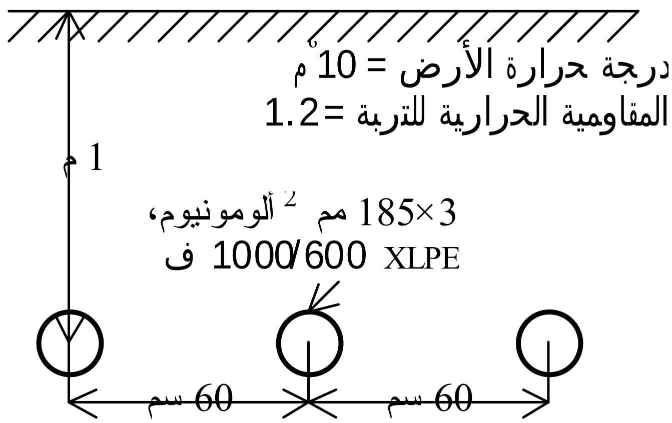
السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = السعة الأمبيرية في الظروف القياسية × معامل التقنينة لدرجة حرارة الأرض × معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة × معامل التقنين التجميعي × معامل التقنين لعمق الدفن

السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = ٥٩٠ × ٠,٩٣ × ٠,٧٤ × ٠,٨٦ × ٠,٩١

= ٣١٧,٧٧ أمبير

مثال ٣ - ٥.:

احسب السعة الأمبيرية لنظام الكابلات الموضح بالشكل



من جدول ٣ -٣ السعة الأمبيرية في الظروف القياسية لكابل XLPE ألومونيوم ذي ٣ قلوب ومساحة مقطع ١٨٥ مم^2 = ٣٥٠ أمبير

معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = ١,٠٣ (جدول ٣ -٤، كابل XLPE ودرجة حرارة ١٠° م)

معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = ١ (المقاومية الحرارية للتربة هنا تساوي القيمة القياسية)

معامل التقنين التجميعي = ٠,٩٠ (جدول ٣ -٦ عند جهد ١/٠,٦ ك ف ، عدد كابلات ٣ ، مسافة ٦٠ سم)

معامل التقنين لعمق الدفن = ٠,٩٤ (جدول ٣ -٧ عند عمق ١م، جهد ١/٠,٦ ك ف، مساحة مقطع٧٠ -٣٠٠ مم^2)

السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = ٣٥٠ × ١,٠٣ × ١ × ٠,٩ × ٠,٩٤

= ٣٠٥ أمبير

جدول ٣ -٧ معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز الكابل)

عمق الدفن (متر)	١/٠,٦ ك ف			١,٩/ ٣,٣ حتى١٩/٣٣ ك ف	
	حتى ٥٠ مم٢	من ٧٠ إلى ٣٠٠ مم٢	أعلى من ٣٠٠ مم٢	حتى ٣٠٠ مم٢	أعلى من ٣٠٠ مم٢
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	- -	- -
٠,٦٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	- -	- -
٠,٨٠	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٤	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٥	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٨	٠,٩٧
١,٢٥	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٠	٠,٩٦	٠,٩٥
١,٥٠	٠,٩٣	٠,٩١	٠,٨٩	٠,٩٥	٠,٩٤
١,٧٥	٠,٩٢	٠,٨٩	٠,٨٧	٠,٩٤	٠,٩٢
٢,٠٠	٠,٩١	٠,٨٨	٠,٨٦	٠,٩٢	٠,٩٠
٢,٥٠	٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٥	٠,٩١	٠,٨٩
٣أو أكثر	٠,٨٩	٠,٨٦	٠,٨٣	٠,٩٠	٠,٨٨

٣ -٦ -٣ الكابلات الموضوعة في مجارٍ

الظروف القياسية لهذه الكابلات كما يلي:

١. درجة حرارة الأرض ١٥° مئوية
٢. المقاومية الحرارية للتربة ١,٢ كلفن.متر/وات
٣. المسافة بين الكابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٨٠ سم.
٤. عمق الدفن ٥٠ سم لكابلات ١ك ف، ٨٠ سم لأعلى من ١ ك ف

وكما في الحالات السابقة أي اختلاف بين الظروف الفعلية التي يتعرض لها الكابل وهذه الظروف القياسية يلزم تصحيح السعة الأمبيرية للكابل، وبالنسبة لمعاملات التقتين لدرجة حرارة الأرض هي نفسها كما في حالة الكابلات المدفونة مباشرة في التربة أما باقي معاملات التقنين لباقي الظروف فهي موضحة بالجداول ٣ -٨ إلى ٣ - ١٠. وخطوات تحديد السعة الأمبيرية للكابلات في هذه الحالة هي نفس الخطوات المتبعة في الحالات السابقة.

جدول ٣ -٨ معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة للكابلات الموضوعة في مجارٍ

حجم الموصل(مم^٢)	المقاومية الحرارية للتربة K.m/W						
	٠,٨	٠,٩	١,٠	١,٥	٢,٠	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد							
حتى ١٥٠	١,١٠	١,٠٧	١,٠٤	٠,٩٤	٠,٨٧	٠,٨١	٠,٧٥
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١١	١,٠٨	١,٠٥	٠,٩٤	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٣
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٣	١,٠٩	١,٠٦	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٠
كابل عديد القلوب							
حتى ١٦	١,٠٥	١,٠٤	١,٠٣	٠,٩٧	٠,٩٢	٠,٨٧	٠,٨٣
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,٠٧	١,٠٥	١,٠٣	٠,٩٦	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٧٨
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٧	٠,٨٢	٠,٧٦

مثال ٣ -٦:

منشأة صناعية تحتاج إلى كابلات XLPE بمقنن جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت لتغذية حمل مقداره ١٥٠٠ أمبير لكل وجه. اقتضت ظروف التشغيل استعمال ٦ كابلات ثلاثية القلوب داخل مجارٍ يفصل بينها مسافات ٤٥ سم (بين مراكز المجاري المتجاورة) والمجاري كلها مدفونة في وضع أفقي مسطح على عمق ١,٢٥ متر. فإذا كانت المقاومية الحرارية للتربة ١ كلفن.متر/وات ودرجة حرارتها ٣٠° م. اختار الكابل المناسب لحمل هذا التيار في هذه الظروف.

الحل

خلافا لكل الأمثلة السابقة فالمعلوم هنا هو السعة الأمبيرية في ظروف التشغيل العادية، وحيث إن جداول الكابلات تعطي السعة الأمبيرية في الظروف القياسية فإنه لاختيار الكابل المناسب يلزم تحديد السعة الأمبيرية القياسية المطلوبة.

السعة الأمبيرية للكابل الواحد في ظروف التشغيل الطبيعية = ١٥٠٠÷ ٦ = ٢٥٠ أمبير

معاملات التقنين لهذه الحالة كما يلي:

معامل تقنين درجة حرارة الأرض = ٠,٨٩ (جدول ٣ -٤ لكابل XLPE عند ٣٠° م)

معامل تقنين المقاومية الحرارية للتربة = ١,٠٣ (جدول ٣ -٨ لكابل ذي قلوب عديدة بمساحة مقطع من٢٥ إلى ١٥٠مم^٢ كما هو متوقع تبعا لقيمة التيار)

معامل التقنين التجميعي = ٠,٨٦ (جدول ٣ -١٠ لكابل جهد ١/٠,٦ ك ف وعدد ٦ مجارٍ ومسافة ٤٥ سم بين مركز المجاري)

معامل تقنين عمق الدفن = ٠,٩٥ (جدول ٣ -٩ لكابل عديد القلوب جهد ١/٠,٦ ك ف داخل مجارٍ على عمق ١,٢٥ متر)

معامل التقنين الكلي = حاصل ضرب معاملات التقنين الأربعة

= ٠,٨٩ × ١,٠٣ × ٠,٨٦ × ٠,٩٥

= ٠,٧٤٨٩٤٣٩

السعة الأمبيرية في ظروف التشغيل العادية = السعة الأمبيرية القياسية × معامل التقنين الكلي

٢٥٠ = السعة الأمبيرية القياسية × ٠,٧٤٨٩٤٣٩

السعة الأمبيرية في الظروف القياسية = ٢٥٠ ÷ ٠,٧٤٨٩٤٣٩ = ٣٣٣,٨ أمبير

وبالبحث في جدول ٣ -٣ عن كابل عديد القلوب سعته الأمبيرية مساوية أو قريبة من ٣٣٣,٨ أمبير نجد أن أقرب كابلين لهذه السعة هما:

الكابل ذو مساحة مقطع ٩٥ مم^2 سعته الأمبيرية ٣١٠ أمبير

الكابل ذو مساحة مقطع ١٢٠ مم^2 سعته الأمبيرية ٣٦٠ أمبير

ولذا نختار الكابل الذي مساحة مقطعه ١٢٠ مم^2 حتى يكون أكثر أمانا.

جدول ٣ -٩ معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز المجرى)

عمق الدفن (متر)	١/٠,٦ ك ف		١,٩/ ٣,٣ حتى١٩/٣٣ ك ف	
	قلب واحد	عديد القلوب	قلب واحد	عديد القلوب
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	- -	- -
٠,٦٠	٠,٩٨	٠,٩٩	- -	- -
٠,٨٠	٠,٩٥	٠,٩٧	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٣	٠,٩٦	٠,٩٨	٠,٩٩
١,٢٥	٠,٩٠	٠,٩٥	٠,٩٥	٠,٩٧
١,٥٠	٠,٨٩	٠,٩٤	٠,٩٣	٠,٩٦
١,٧٥	٠,٨٨	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٥
٢,٠٠	٠,٨٧	٠,٩٣	٠,٩٠	٠,٩٤
٢,٥٠	٠,٨٦	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٩٣
٣أو أكثر	٠,٨٥	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٩٢

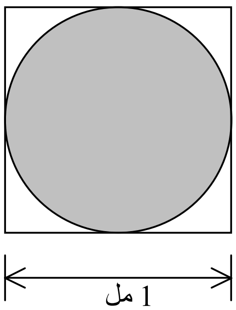
جدول ٣ -١٠ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب داخل مجارى في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد المجاري في المجموعة	المسافة بين مراكز المجاري (متر)			
		تلامس	٠,٣٠	٠,٤٥	٠,٦٠
١ /٠,٦	٢	٠,٩٠	٠,٩٣	٠,٩٥	٠,٩٦
	٣	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٠	٠,٩٣
	٤	٠,٧٨	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩١
	٥	٠,٧٥	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٠
	٦	٠,٧٢	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٩٠
١,٩/ ٣,٣ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨٨	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
	٣	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٨٩
	٤	٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٤	٠,٨٧
	٥	٠,٧١	٠,٧٧	٠,٨٢	٠,٨٥
	٦	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤
٣٣/١٩	٢	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩٢	٠,٩٣
	٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥	٠,٨٧
	٤	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٥	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٧٩	٠,٨٣
	٦	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢

٣ -٧. مقياس السلك

إنه من غير العملي تصنيع كابلات أو حتى أسلاك مكشوفة بأي مساحة مقطع ولكن يتم تصنيع الأسلاك والكابلات بأحجام قياسية ومساحات مقطع محددة (انظر الجداول السابقة). وعموما فإن مساحة الموصل أو السلك يمكن التعبير عنها بعدة طرق:

الأولى: بالملي متر المربع كما هو معطى في جميع الجداول السابقة



الثانية: بالملي الدائريcircular mil أو المل المربعsquare mil. المل الدائري هو مساحة دائرة قطرها يساوي ١ مل و ١ مل = ٠٫٠٠١ بوصة = ٠٫٠٢٥٤ مم، والمل المربع عبارة عن مساحة مربع طول ضلعه ١ مل. والعلاقة بين المل الدائري(c mil) والمل المربع(sq mil) يمثلها الشكل المقابل حيث تمثل نسبة مساحة الدائرة المظللة إلى مساحة المربع نفس نسبة المل الدائري إلى المل المربع

وعموما فإن:

$$1\ \text{c mil} = 0.7854\ \text{sq mil} = 0.7854 \times 10^{-6}\ \text{in}^2 = 506.71 \times 10^{-6}\ \text{mm}^2$$

الثالثة : وهي الأكثر شيوعا واستعمالا وهي استخدام مقياس السلك wire guage و مقياس السلك هو عبارة عن رقم صحيح يعطي فكرة عن حجم السلك وأشهر مقياس سلك مستخدم هو مقياس السلك الأمريكي American Wire Guage (AWG) وهذا الرقم يتراوح من (٤/٠) ٠٠٠٠ وحتى ١٢. والجدير بالذكر هنا أنه كلما كبر مقياس السلك صغرت مساحته أي أن أكبر مساحة هي للسلك الذي يكون مقياسه ٠٠٠٠ (تكتب أيضا ٤/٠) وأصغر مساحة مقطع هي للسلك الذي مقياسه ١٢. وهناك علاقة تربط بين مساحة مقطع السلك مقدرة بالمل الدائري ورقم المقياس لنفس السلك، وهذه العلاقة هي كالآتي:

$$a,\ (\text{c mil}) = \frac{105500}{1.261^{n}}$$

حيث (a) هي مساحة مقطع السلك مقدرة بالمل الدائري، (n) هو رقم مقياس السلك مع مراعاة أنه لأرقام المقياس ٠٠٠٠,٠٠٠,٠٠,٠ فإن قيم n المناظرة هي ٠,(١□),(٢□),(٣□) على الترتيب.

٣ -٨. فقد الفولطية

عند مرور التيار في موصلات الكابل يحدث هبوط في الجهد – فقد الفولطية - بين طرفي الموصل، وهذا الفقد في الجهد يساوي حاصل ضرب التيار ومعاوقة الكابل. إذا فقد الفولطية هذا كبيرا فإنه يتسبب في أن الجهد الواصل للمعدات و الأجهزة منخفضا بطريقة لا تناسب الأداء السليم لهذه المعدات والأجهزة. وفقد الفولطية يكون ذا أهمية كبرى ويجب أن يولى عناية خاصة في دوائر الجهد المنخفض عنها في دوائر الجهد المتوسط والجهد العالي، وعموما فإن فقد الفولطية في دوائر الجهد الأعلى من ١٠٠٠ فولت لا يمثل نسبة تذكر إلا عندما يكون مسارات الكابل طويلا جدا. وعادة ما تعطى قيم فقد

الفولطية في جداول خصائص الكابلات بالملي فولت/أمبير/متر (mV/A/m) أي مقدار فقد الفولطية مقدرا بالملي فولت لكل متر من طول الكابل لكل ١ أمبير من التيار المار في موصل الكابل، وفي حالة عدم إعطاء هذه القيم يتم استنتاجها من العلاقات الآتية:

لدوائر الوجه الواحد يكون: $mV/A/m = 2Z$

لدوائر الاوجة الثلاثة يكون: $mV/A/m = \sqrt{3}\,Z$

حيث Z هي معاوقة موصل الكابل مقدرة بالأوم/كيلومتر (Ω/km)

جدول ٣ -١١ يوضح قيم هبوط الجهد لعدد من كابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت عند تردد ٥٠ هرتز –التردد في المملكة ٦٠ هرتز - ولكن على أي الأحوال سيفي هذا الجدول بغرض إيضاح كيفية حساب فقد الفولطية باستخدام الجدول. أما جدول ٣ -١٢ فيعطي الخواص الكهربية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت – الجدول مأخوذ من مرجع رقم وتم تعديل قيم المفاعلة من تردد ٥٠ هرتز إلى تردد ٦٠ هرتز - وسوف نستخدم هذا الجدول في إيضاح كيفية حساب فقد الفولطية في حالة عدم توافر الجداول الخاصة بها. وسوف نوضح أيضا كيفية حساب فقد القدرة في موصل الكابل باستخدام نفس الجدول.

جدول ٣ -١١ فقد الفولطية (mV/m/A) لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

مساحة مقطع الموصل (مم٢)	نحاس: قلب وحيد – مثلثي	نحاس: قلب وحيد – مسطح	نحاس: قلبان	نحاس: ٣ أو ٤ قلوب	ألومونيوم: قلب وحيد – مثلثي	ألومونيوم: قلب وحيد – مسطح	ألومونيوم: قلبان	ألومونيوم: ٣ أو ٤ قلوب
٥٠	٠,٨٦	٠,٨٧	١,٠٠	٠,٨٧	١,٤٠	١,٥٠	١,٧٠	١,٤٠
٧٠	٠,٦٢	٠,٦٥	٠,٧٠	٠,٦١	٠,٩٨	١,٠٠	١,٢٠	٠,٩٩
٩٥	٠,٤٦	٠,٥٢	٠,٥٢	٠,٤٥	٠,٧٢	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,٧٢
١٢٠	٠,٣٧	٠,٤٥	٠,٤٢	٠,٣٦	٠,٥٨	٠,٦٥		٠,٥٨
١٥٠	٠,٣٢	٠,٤١	٠,٣٥	٠,٣٠	٠,٤٨	٠,٥٦		٠,٤٨

مثال :

احسب مستعينا بجدول ٣ -١١ فقد الفولطية في كابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت الآتية:

١. كابل ٣❖٩٥ مم٢ نحاس طوله ٥٠ متر ويحمل تياراً مقداره ٢٠٠ أمبير
٢. كابل ٢❖٧٠ مم٢ ألومونيوم طوله ١٠٠ متر ويحمل تياراً مقداره ١٥٠ أمبير

٣. كابل ١❖١٢٠ مم٢ نحاس مستخدم في دائرة ثلاثية الطور ومرتب في وضع تلامس مثلثي مع الكابلين الآخرين طوله ٤٥ متر ويحمل تيار ٣٠٠ أمبير

الحل

١. للكابل الأول نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ٠,٤٥ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ٠,٤٥ × ٥٠ × ٢٠٠ = ٤٥٠٠ ملي فولت
= ٤,٥ فولت

٢. للكابل الثاني نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ١,٢ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ١,٢× ١٠٠ × ١٥٠ = ١٨٠٠٠ ملي فولت
= ١٨ فولت

٣. للكابل الثالث نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ٠,٣٧ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ٠,٣٧ × ٤٥ × ٣٠٠ = ٤٩٩٥ ملي فولت
= ٤,٩٩٥ فولت

جدول ٣ -١٢ الخواص الكهربية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

مساحة مقطع الموصل (مم٢)	كابل ذو قلب واحد				كابل متعدد القلوب		
	مقاومة التيار المتردد عند ٩٠° م (Ω/km)		المفاعلة عند ٦٠ هرتز (Ω/km)		مقاومة التيار المتردد عند ٩٠° م (Ω/km)		المفاعلة عند ٦٠ هرتز (Ω/km)
	نحاس	ألومونيوم	مثلثي	مسطح	نحاس	ألومونيوم	
١٦					١,٤٧٠	٢,٤٢٠	٠,٠٩٦
٢٥					٠,٩٢٧	١,٥٤٠	٠,٠٩٥
٣٥					٠,٦٦٨	١,١١٠	٠,٠٩٢
٥٠	٠,٤٩٤	٠,٨٢٢	٠,١٢٧	٠,١٧٤	٠,٤٩٤	٠,٨٢٢	٠,٠٩١
٧٠	٠,٣٤٢	٠,٥٦٨	٠,١٢٤	٠,١٩٤	٠,٣٤٢	٠,٥٦٨	٠,٠٩٠
٩٥	٠,٢٤٧	٠,٤١١	٠,١١٨	٠,١٨٨	٠,٢٤٧	٠,٤١١	٠,٠٨٨
١٢٠	٠,١٩٧	٠,٣٢٥	٠,١١٥	٠,١٨٦	٠,١٩٧	٠,٣٢٥	٠,٠٨٨
١٥٠	٠,١٦٠	٠,٢٦٥	٠,١١٦	٠,١٨٧	٠,١٦٠	٠,٢٦٥	٠,٠٨٨
١٨٥	٠,١٢٨	٠,٢١١	٠,١١٥	٠,١٨٦	٠,١٢٨	٠,٢١١	٠,٠٨٨
٢٤٠	٠,٠٩٨	٠,١٦٢	٠,١١٠	٠,١٨١	٠,٠٩٨	٠,١٦٢	٠,٠٨٨

وكما ذكرنا سابقا فإنه في حالة عدم توافر قيم فقد الفولطية فإنه يمكن حسابها من الخواص الكهربية للكابل كما يلي:

في حالة دوائر الوجه الواحد

$$mv/m/A = 2Z$$

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

أما في حالة دوائر الثلاثة أوجه فإن:

$$mv/m/A = \sqrt{3}Z$$

فمثلا للكابل النحاس ذي قلب واحد ومساحة مقطع ٢٤٠ مم٢ في وضع مسطح نجد أن:

المقاومة (R) = ٠,٠٩٨ أوم/كيلومتر ، المفاعلة (X) =٠,١٨١ أوم/كيلومتر

وتكون $z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(0.098)^2 + (0.181)^2} = 0.2058\,\Omega/km$

ويكون فقد الفولطية: mV/m/A = ٢*٠,٢٠٥٨ = ٠,٤١١٦ mV/m/A

أما إذا استخدم نفس الكابل في دائرة ثلاثة أوجه يكون فقد الفولطية:

$$mv/m/A = \sqrt{3}Z = \sqrt{3} \times 0.2058 = 0.3564 \quad mv/m/A$$

الأخطاء في الكابلات الكهربية

الكابلات الكهربية من أقل عناصر منظومة القوى تعرضا للأخطاء وذلك لتعرضها لاختبارات عديدة لضمان جودتها في المصنع وكذلك اختبارات بعد التركيب وقبل التشغيل ولكن هذا لا يمنع من حدوث بعض الأخطاء. ولأن الكابل مكون من عدة طبقات (الموصل – العازل – الغلاف المعدني – طبقة الحماية الخارجية) فسوف نصنف الأخطاء في الكابلات تبعا للجزء الذي يحدث فيه الخطأ.

٢ -٩ أنواع الأخطاء في الكابلات وأسباب حدوثها

أولا: أخطاء الموصل

الأخطاء التي تحدث في الموصل تكون غالبا لأسباب خارجية وأهم هذه الأخطاء:

١. انقطاع موصل الكابل: ويحدث هذا الخطأ نتيجة لأعمال الحفر في مسار الكابلات المدفونة في الأرض ولتلافي حدوث مثل هذا الخطأ يتم وضع شريط تحذيري فوق مسار الكابل لينبه القائمين

بأعمال الحفر بوجود كابل في هذا المكان. ويدفن شريط التحذير في الأرض فوق الكابل بمسافة كافية لتنبيه القائم بالحفر قبل إحداث ضرر في الكابل وعادة يكون تحت سطح الأرض بعمق حوالي ٢٠ سم وفوق الكابل بمسافة ٥٠ سم. وطريقة أخرى لتلافي هذا الخطأ هي استخدام أجهزة خاصة لتحديد مسار الكابل cable locators قبل البدء في عملية الحفر.

٢. أخطاء القصر عند نهايات الكابل وتحدث بسبب وجود أي جسم موصل سواء كان جسم معدني أو كائنات حية كالأفاعي تقوم بتوصيل الجزء المكشوف من نهاية موصل من موصلات الكابل بالأرضي أو بنهاية موصل آخر .

ثانيا : أخطاء العازل

وظيفة العازل هي عزل الموصل عن الغلاف المعدني وعن الموصلات الأخرى ويصمم العازل على تحمل الإجهاد الكهربي الذي يتعرض له في التشغيل العادي وكذلك في الحالات العابرة التي قد يتعرض لها الكابل، وعندما يتعدى الإجهاد الكهربي في العازل الحدود التي يتحملها العازل يحدث له انهيار ويفقد خاصية العزل. ويحدث هذا نتيجة لأسباب مختلفة هي:

١. انهيار الحالة العابرة: يصمم الكابل على تحمل جهد دفعي أكبر بكثير من جهد التشغيل وذلك لفترة زمنية قصيرة جدا (في حدود الملي ثانية أو أقل) وإذا تعرض العازل إلى جهد دفعي أكبر من الذي يمكنه تحمله نتيجة البرق أو عمليات الفصل والتوصيل أو أي ظاهرة عابرة أخرى فإنه ينهار مسببا تفريغ كهربي داخل الكابل و حدوث دائرة قصر بين موصل والأرض أو بين موصلين وبعضهما.

٢. انهيار العازل نتيجة التأين: ويحدث هذا النوع من الانهيار نتيجة لوجود فقاعات غازية أو شوائب داخل العازل والتي تسبب تفريغا جزئيا داخل الفقاعة ونتيجة لهذا التفريغ يحدث تدهور تدريجي في خواص العازل إلى أن يحدث انهيار كامل له ما لم يتم اكتشاف هذا العيب قبل ذلك.

٣. الانهيار الحراري: لكل مادة عازلة درجة حرارة يعمل عندها بطريقة سليمة، فإذا ارتفعت درجة حرارة العازل عن تلك الدرجة تبدأ خواص العازل في التدهور تدريجيا إلى أن ينهار. وارتفاع درجة الحرارة يكون بسبب تعرض الكابل لحمل زائد لفترة طويلة أو تعرضه لتيارات قصر أكبر من تيار القصر المقنن للكابل.

٤. تدهور خواص العازل نتيجة للتقادم وطول فترة الاستخدام أو نتيجة للعوامل البيئية كتسرب الرطوبة لداخل الكابل نتيجة لتآكل الغلاف المعدني.

ثالثا: أخطاء الغلاف المعدني

للغلاف المعدني أهمية كبرى في حماية العازل الرئيسي من العوامل البيئية وكذلك في توزيع المجال الكهربي داخل الكابل وأيضا في احتواء الموائع كالزيت أو الغاز حالة استخدامها للعزل أوللتبريد. ولذلك فإن أخطاء الغلاف المعدني تؤدي حتما إلى أخطاء في الكابل. وتنشأ أخطاء الغلاف المعدني نتيجة للأسباب التالية:

١. تعرض الكابل للاهتزازات أثناء عملية النقل قد تسبب شروخ في الغلاف المعدني وكذلك تعرض الكابل للثني مرات عديدة
٢. تعرض الغلاف المعدني لتعاقب التمدد والانكماش الحراري نتيجة للتغير الكبير في الحمل زيادة ونقصا بصفة مستمرة يؤدي إلى حدوث إجهاد ميكانيكي وقد يحدث شروخا فيه إذا استمرت هذه العملية لفترات طويلة
٣. أخطاء أثناء عملية البثق (للغلاف الرصاصي) مما يتسبب في وجود شوائب في الغلاف المعدني تمثل نقط ضعف له.
٤. تعرض الغلاف المعدني للتآكل وخصوصا بعد تآكل طبقة الحماية الخارجية
٥. حدوث تلف ميكانيكي نتيجة زيادة الضغط داخل الكابل في الكابلات التي تستخدم الموائع المضغوطة

رابعا: أخطاء طبقة الحماية الخارجية

رغم أن طبقة الحماية الخارجية ليس لها أي وظيفة كهربية إلا أن حدوث أي خطأ بها يؤدي إلى حدوث خطأ في الغلاف المعدني والذي بدوره يؤدي إلى حدوث تلف في العازل، وأهم خطر يواجه طبقة الحماية الخارجية هو مهاجمة القوارض والنمل الأبيض لها.

٢ -١٠ تحديد أماكن حدوث الأخطاء في الكابل

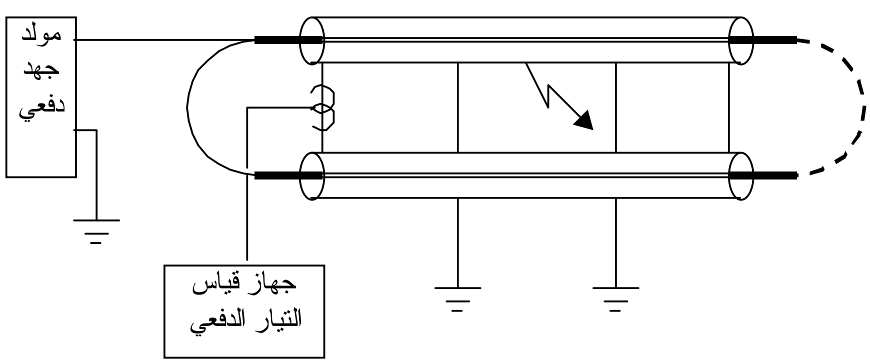
تحديد مكان الخطأ في الكابل ذو أهمية قصوى وذلك لأنه من غير العملي وغير الممكن حفر طول مسار الكابل كله لمعاينة الخطأ وإصلاحه، و في كابلات الجهد المنخفض يكون من السهل تحديد مكان الخطأ باستخدام فكرة قنطرة القياس المعروفة حيث يتم تكوين قنطرة ضلعها المجهول هو الكابل الذي حدث به الخطأ وعند حدوث اتزان للقنطرة يمكن حساب مقاومة الكابل حتى نقطة الخطأ وبمعلومية مقاومة وحدة الأطوال من الكابل يمكن تحديد طول الكابل من نقطة القياس حتى نقطة الخطأ وتتم هذه الطريقة باستخدام جهد منخفض. أما في حالة كابلات الجهد العالي تكون

مقاومة الخطأ عالية حيث ولا يمكن تحديد مكان الخطأ بنفس الطريقة. وسنتعرف هنا على طرق تحديد مكان حدوث الخطأ في العازل الرئيسي وكذلك في طبقة الحماية الخارجية.

٢ -١٠ -١ تحديد مكان الخطأ في العازل الرئيسي

الطريقة الأساسية لاكتشاف وتحديد مكان الخطأ في العازل الرئيسي للكابل هي طريقة التيار الدفعي. في هذه الطريقة يتم توصيل جهد دفعي عالٍ باستخدام مولد جهد دفعي خاص إلى الكابل الذي حدث به الخطأ ويقاس التيار الدفعي في الكابل ويتم تسجيل شكل موجة التيار على كاشف موجات ذي إمكانية تخزين. أثناء عملية القياس يجب أن تكون كل الأغلفة المعدنية موصولة ببعضها. وللتغلب على تأثير أي وصلات قد تكون موجودة بين بداية الكابل ومكان الخطأ يتم توصيل كابل آخر مع الكابل الذي به الخطأ على التوازي وقياس الفرق بين تياريهما كما في شكل ٣ -٨.

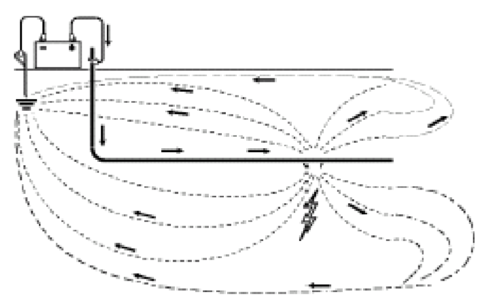
ما يحدث هو أن الجهد الدفعي يسري (ينتقل أو يسافر) كموجة راحلة على طول الكابل، وعند نقطة الخطأ تكون قيمة الجهد صفراً مما يسبب موجات منعكسة على صورة نبضات تنتقل على طول الكابل في الاتجاهين، وهذه النبضات تبدأ في الانعكاس مرات متتالية. ويتم تحديد مكان الخطأ عن طريق قياس الزمن بين انعكاسين متتاليين. وحيث إن الزمن الذي تستغرقه الموجة للانتقال من أول الكابل إلى آخره يكون معلوما من قبل حيث إنه خاصية للكابل - يعرف بزمن الانتشار propagation time - فإنه يمكن تحديد مكان الخطأ عن طريق حساب نسبة الزمن بين انعكاسين متتاليين إلى زمن الانتشار الخاص بالكابل فيمكن تحديد مكان الخطأ. ولأن سرعة انتقال الموجات في الكابل تعتمد فقط على نوع العازل فإنه يمكن حساب سرعة انتقال الموجة في الكابل ومن ثم ضربها في الزمن بين انعكاسين متتاليين فنحصل على المسافة بين نقطة القياس و نقطة الخطأ.



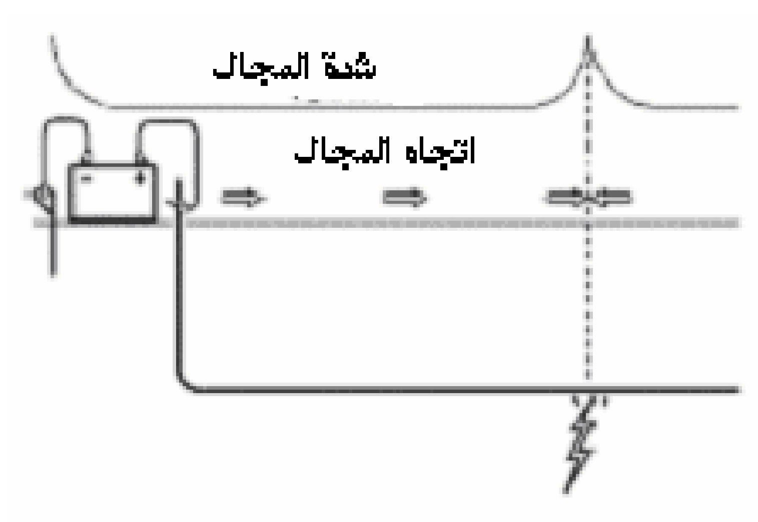
شكل ٣ - ٨ طريقة التيار الدفعي لتحديد مكان الخطأ في الكابلات

٢ -١٠ -٢ تحديد مكان الخطأ المتصل بالأرض

تعتمد طريقة تحديد هذه النوعية من الأخطاء على حقن تيار مستمر في الكابل، هذا التيار سيجد له مسارا إلى الأرض من خلال نقطة الخطأ ويكون توزيع المجال الكهرومغناطيسى الناتج عن هذا التيار كما هو موضح بشكل ٣ -٩. من شكل توزيع المجال الكهرومغناطيسي يمكننا ملاحظة أن شدة المجال أعلى ما يمكن عند نقطة الخطأ وأيضا خطوط المجال الخارجة من عند نقطة الخطأ تتوزع في اتجاهين متضادين. وبالتالي باستخدام أي جهاز كاشف للمجال الكهرومغناطيسي وتتبع المجال حول الكابل – عادة عن طريق قياس الجهد المتولد - نجد أن المجال يزداد كلما اتجهنا نحو نقطة الخطأ إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له ثم ينعكس اتجاهه نكون قد وصلنا إلى نقطة الخطأ. شكل ٣ -١٠ يبين تغير قيمة المجال واتجاهه بدءا من مصدر التيار المستمر وحتى نقطة الخطأ.



شكل ٣ -٩ تحديد مكان الخطأ الأرضي بالكابل



شكل ٣ -١٠ شدة واتجاه المجال وتحديد نقطة الخطأ

المملكـة العربيــة الســعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

شبكات كهربائية

دوائر القصر الكهربي

دوائر القصر الكهربي

٤

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذا الفصل تكون:

١ -ملما بأنواع دوائر القصر المختلفة وأسبابها

٢ -ملما كيفية حساب تيار القصر ومقنن القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه

٣ -ملما بتأثير كل من القصر وزمن الفصل على الشبكة

مستوى الأداء المطلوب:

الوقت المتوقع للتدريب:

الوسائل المساعدة:

٤ -استخدم التعليمات في هذا الفصل .

متطلبات الجدارة:

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

٤ -١. مقدمة

في وضع التشغيل العادي تعمل منظومة القوى عند جهد ثابت القيمة والتردد وتكون الجهود على الأوجه الثلاثة وكذلك التيارات متزنة، وتكون قيم التيارات في مختلف أجزاء المنظومة داخل حدود القيم المسموح بها للتشغيل الآمن. ولكن نظرا للانتشار الجغرافي الكبير لمنظومة القوى ولكون معظم مكوناتها موجودة في مساحات مكشوفة –كخطوط النقل والتوزيع التي تقطع مسافات طويلة في الصحاري وداخل المدن والقرى - فإنها تكون عرضة لحدوث أعطال أو أخطاء تؤدي إلى خلل ببعض شروط التشغيل الآمن أو بها جميعا. ولعل أكبر الأعطال خطرا وأشدها تأثيرا ضارا على منظومة القوى هو حدوث دوائر قصر. والمقصود بدوائر القصر هو سلوك التيار مسلكا غير نظامي خارج الموصلات المعدة لسريانه كأن يجد مسارا مباشرا بين أحد الموصلات والأرض أو بين الموصلات وبعضها البعض نتيجة لانهيار العازل الذي يحكم سريان التيار داخل الموصلات أو سقوط جسم موصل بين الموصلات وبعضها. ونتيجة للمقاومة الصغيرة جدا لدوائر القصر – تعتبر صفراً نظرا لصغرها مقارنة بمعاوقات أجزاء المنظومة - فإن التيار الناتج عن حدوث دوائر القصر يكون كبيرا جدا وقد يصل إلى أكثر من عشرين ضعف التيار المقنن. وهذا التيار الكبير له آثار تدميرية خطيرة على أجزاء منظومة القوى نتيجة للارتفاع الشديد في درجة الحرارة وكذلك نتيجة للقوى الكهرومغناطيسية الكبيرة الناتجين عن تيار القصر.

ولأنه لا يمكن منع حدوث دوائر القصر فيجب إعداد التجهيزات الخاصة بحماية منظومة القوى بطريقة تمكنها من فصل تيارات القصر بطريقة آمنة. ومن هنا جاءت أهمية دراسة دوائر القصر الكهربي حيث عن طرقها يمكن تحديد تيارات القصر في الأماكن المختلفة من منظومة القوى لتحديد سعة القطع اللازمة للقواطع التي سيتم تركيبها في الدوائر المختلفة لفصلها حالة حدوث خطأ بها. و لضبط مرحلات الحماية يلزم أيضا إجراء تحليل دوائر القصر عند كل نقطة من نقاط المنظومة. والجدير بالذكر هنا أن تحليل دوائر القصر الذي يتم لتحديد سعة القطع للقواطع يختلف عن ذلك الذي يتم لضبط تيار وزمن التشغيل للمرحلات، حيث يجب أن يكون القاطع قادرا على فصل أقصى تيار قصر ممكن حدوثه وبالتالي يتم حساب مقنن القطع للقاطع على أساس من أكبر تيار قصر، في حين أنه يجب ضبط المرحل بحيث يشعر بأقل تيار قصر ممكن حدوثه وبالتالي فإنه يتم إجراء التحليل مع فرض حدوث دائرة القصر عند أبعد مكان من موقع المرحل.

وفي هذا الباب سوف نستعرض الأسباب التي تؤدي إلى حدوث دوائر القصر في منظومات القوى، ونتعرف على المصادر التي تغذي دوائر القصر و على أنواع دوائر القصر المختلفة وإن كنا سنكتفي هنا

بدراسة القصر المتماثل فقط. ولأن منظومة القوى تحتوي على كثير من المكونات وخصوصا المحولات التي تفصل الشبكة إلى أجزاء ذات جهود مختلفة يصعب معها إجراء التحليل بطريقة مباشرة فسوف ندرس كيفية تمثيل مكونات المنظومة المختلفة بطريقة تسهل إجراء الحسابات وتتغلب على الصعوبات التي يسببها وجود المحولات، حيث يتم تمثيل مكونات المنظومة بنظام الوحدة.

٤ -٢. أسباب حدوث القصر في منظومات القوى

إن الأسباب التي تؤدي إلى حدوث دوائر القصر في الدوائر الكهربية كثيرة منها ما هو خارجي ومنها ما هو نابع من منظومة القوى ذاتها، وينشأ القصر الكهربي عموما عندما يجد التيار مسارا خارج الموصلات الكهربية وذلك عندما يحدث تلامس مباشر – نتيجة انهيار العازل – بين الموصل والأرض أوموصلين مع بعضهما البعض ومن أمثلة الأسباب الخارجية لدوائر القصر:

- الطيور والأفاعي عندما تسبب قصرا بين موصلات خطوط النقل بعضها البعض أو بين أحد الموصلات وجسم البرج
- اصطدام طائرة بخطوط النقل الهوائي
- اصطدام سيارة بمحول أو عمود
- الفئران عندما تأكل عازل الكابلات وتجعل الموصل مكشوفا ملامسا للأرض أو عندما تدخل في لوحات التوزيع فتسبب توصيل أحد القضبان بجسم اللوحة أو توصيل قضيبين ببعضهما
- سقوط شجرة على موصلات خط النقل
- الأعمال التخريبية المتعمدة
- الرياح الشديدة قد تسبب التواء أسلاك خط النقل وملامستها لبعضها
- انقطاع أحد الموصلات تحت تأثير التحميل الميكانيكي الزائد نتيجة لتراكم ثلوج عليه وملامسته لموصل آخر أو لجسم البرج
- صواعق البرق عندما تضرب خط النقل وتسبب ارتفاع الجهد بطريقة كبيرة تؤدي إلى انهيار عوازل خط النقل أو المحولات

و الأسباب الداخلية تتلخص في انهيار عازل الموصلات في المولد أو المحول أو المحرك وتصبح هذه الموصلات كما لو كانت مكشوفة وتتسبب في قصر إما بين لفتين لنفس الوجه أو بين لفات أحد الأوجه وجسم المولد أو المحول أو المحرك، أو تسبب قصر بين ملفات وجهين مختلفين.

٤_٣ مصادر دوائر القصر

أثناء حدوث القصر تمر تيارات كبيرة جدا نتيجة للمقاومة الصغيرة للشبكة أثناء حدوث القصر، وهذه التيارات تكون أكبر بكثير من تيار الحمل ولذا فإنه يتم إهمال جميع الأحمال الموجودة بالشبكة قبل حدوث الخطأ. والمصادر التي تقوم بتغذية تيار القصر هي:

٤_٣_١ المولدات التزامنية

حيث إن هذه المولدات هي مصادر الجهد التي تغذي المنظومة في حالة التشغيل العادي، فعند حدوث القصر تستمر هذه المولدات في إمداد المنظومة بالجهد فتدفع بتيار كبير خلال دائرة القصر وذلك قبل أن تعمل أجهزة الحماية وأجهزة التحكم المختلفة. وفي اللحظات التي تلي حدوث القصر مباشرة يرتفع التيار بصورة كبيرة قبل أن تبدأ أجهزة التحكم في العمل لضبط قيمة الجهد فلذلك تكون القوة الدافعة للمولد ثابتة رغم ارتفاع التيار بهذه الصورة الكبيرة والسبب في ذلك يرجع إلى أنه عند حدوث الخطأ فإن قيمة ممانعة المولد تختلف عن قيمتها في وضع التشغيل العادي بسبب تغير قيمة المفاعلة الحثية له نتيجة التغيرات التي تطرأ على المجال المغناطيسي داخل المولد، حيث تنخفض مفاعلة المولد بثلاث مراحل هي:

ممانعات المولد

١. مفاعلة دون الحالة العابرة (x''_d) sub-transient reactance

وهي قيمة المفاعلة لحظة حدوث الخطأ، وهي صغيرة جدا حيث يكون تيار الخطأ في هذه اللحظات أكبر ما يمكن، وهذه القيمة هي التي تستخدم عند حساب تيار القصر.

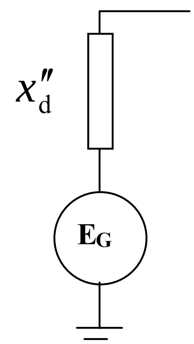
٢. مفاعلة الحالة العابرة (x'_d) transient reactance

وهي قيمة المفاعلة بعد حدوث الخطأ بفترة زمنية قصيرة لا تتعدى بضع دورات، وهي أكبر من مفاعلة دون الحالة العابرة، وهذه القيمة تستخدم في دراسة اتزان المنظومة بعد إزالة الخطأ وعمل أجهزة التحكم.

٣. مفاعلة التزامن synchronous reactance (x_s)

وهي قيمة المفاعلة في وضع التشغيل العادي أو بعد فترة طويلة من حدوث الخطأ، وتستخدم هذه المفاعلة في حساب أداء المولد في ظروف التشغيل العادية.

وتكون الدائرة المكافئة للمولد حالة حدوث خطأ عبارة عن جهد ثابت يساوي القوة الدافعة الكهربية للمولد بالتوالي مع مفاعلة دون الحالة العابرة وتهمل المقاومة، كما هو موضح في شكل ٤ -١



شكل ٤ -١ الدائرة المكافئة للمولد

٤_٣_٢ المحركات والمكثفات التزامنية

المكثف التزامني هو آلة تزامنية متصلة بالقضبان العمومية ولكنها لا تدار بمحرك أولي لتعمل كمولد ولا تغذي حملا ميكانيكيا للعمل كمحرك –وإن من الممكن تشغيل نفس الآلة كمحرك والاستفادة منها كمكثف تزامني - وإنما يتم تغذية أقطابها بتيار كبير يجعلها تدفع بقدرة غير فعالة إلى الشبكة أي أنها تعمل عمل المكثف ولذا يطلق عليها المكثف التزامني.

رغم أن المحركات والمكثفات التزامنية لا تدار بواسطة محرك أولي إلا أنه عند حدوث القصر ونتيجة للقصور الذاتي للأجزاء الدوارة في كل منهما والطاقة الميكانيكية المختزنة في هذه الأجزاء الدوارة يستمر كل من المحرك والمكثف التزامني في الدوران وتوليد جهد يقوم بتغذية دائرة القصر.

وفي حالة التشغيل العادي تتشابه الدائرة المكافئة للمحرك والمكثف التزامني مع الدائرة المكافئة للمولد إلا أن اتجاهات سريان القدرة في المولد تختلف عنها في المحرك والمكثف. وفي حسابات تيار القصر، لا تختلف الدائرة المكافئة للمحرك ولا للمكثف التزامني عن المولد في شيء ، بل تكون الدائرة المكافئة للمولد هي نفسها للمحرك وللمكثف التزامني ولكن طبعا قد تختلف القيم العددية للجهد و للمعاوقة.

٤_٣_٣ المحركات الحثية

للمحركات الحثية ذات القدرات الأكبر من ٥٠ حصان (٥٠ hp) تكون الطاقة الميكانيكية المختزنة في العضو الدائر كافية لدفع المحرك لتوليد جهد يقوم بتغذية تيار القصر ويعامل معاملة المولد التزامني من حيث الدائرة المكافئة. أما المحركات الأصغر من ذلك فيمكن إهمال مساهمتها في تغذية تيار القصر.

٤_٣_٤ منظومة الإمداد

ومنظومة الإمداد تحتوي على مجموعة كبيرة من المولدات وشبكة نقل وتوزيع ذات مقاومة صغيرة، ويمكن النظر إلى منظومة الإمداد على أنها مصدر ذو جهد ثابت و ممانعة كهربية على التوالي في الغالب تكون صغيرة بدرجة كبيرة، ومثل هذه المنظومة تساهم في تغذية تيار القصر حيث إن جهدها يظل ثابتا حتى أثناء حدوث القصر.

٤_٤ النظام بالوحدة

في دراستك للآلات الكهربية رأيت كيف أن المحول يقسم الدائرة الكهربية إلى جزأين غير مرتبطين عن طريق التوصيل حتى يمكن تطبيق قوانين كيرشوف للتيار والجهد، وإنما يرتبطان معا عن طريق الحث الكهرومغناطيسي و كل منهما له جهد مختلف عن الآخر. ولحساب أداء المحول كان لزاما نسبة معاملات أحد الجانبين إلى الجانب الآخر و إجراء الحساب في جانب واحد ثم للحصول على القيم الحقيقة للجانب الآخر نعيد القيم المحسوبة بنسب التحويل العكسية. ولعلك مازلت تذكر كم كانت هذه الحسابات مزعجة وخصوصا بما فيها من أعداد مركبة.والجهد ينقل بنسبة اللفات والتيار بعكس نسبة اللفات والمعاوقات بمربع نسبة اللفات وآه لو كان المحول ثلاثي الأوجه وكان أحد جانبيه متصل دلتا والآخر متصل نجمة، فما بالك عند العمل على منظومة قوى تحتوي على أكثر من محول بل ربما تصل إلى مئات أو آلاف المحولات؟!!! هل سيكون الأمر صعبا أم مستحيلا أم لا يجب أن نفكر في مثل هذا الأمر من البداية؟ الإجابة على السؤال الأخير طبعا لا لن يكون صعبا ولا مستحيلا ولن نشغل تفكيرنا بالمحولات قلت أو كثرت طالما أن هناك النظام بالوحدة.

في النظام بالوحدة يتم تمثيل معاوقات مكونات منظومة القوى كنسب من قيم إسنادية يتم تحديدها بطريقة تحقق المميزات الآتية:

١. في النظام بالوحدة لا تمثل المحولات مشكلة حيث إن قيم المعاوقات -مقدرة بالوحدة- تكون ثابتة بغض النظر عن الجهة التي تسند إليها في حين أنه عند تقدير المعاوقات بالأوم يلزم أن تنسب جميع المعاوقات إلى جهة واحدة أو جزء واحد من المنظومة.
٢. في النظام بالوحدة لا تؤثر كيفية توصيل المحولات على قيمة المعاوقة
٣. معاوقات الآلات الكهربية تختلف اختلافا كبيرا إذا ما قيمت بالأوم تبعا لحجمها أما في النظام بالوحدة فإنها تختلف في حدود ضيقة للغاية وعلى ذلك يمكن تقدير معاوقة آلة بمقارنتها بأخرى من نفس النوع بغض النظر عن الحجم.

٤. معاوقات الآلات الكهربية تعطى عادة مقدرة بالوحدة على لوحة البيانات الاسمية للآلة مما يجعلها مهيأة للاستعمال بأخذ مقننات الآلة كقيم إسنادية.

وعموما في معظم الحالات في حياتنا العامة تكون الأرقام الحقيقية غير ذات مدلول إلا إذا وضعت في صورة نسبة، فمثلا إذا قلنا ن عدد الطلبة الناجحين في مادة الشبكات هو ٩٠ طالب فسيتبادر إلى الذهن سؤال آخر وكم عدد الطلاب الذين أدوا الاختبار أو كم عدد الراسبين فيها؟ ولكن إذا قلنا إن نسبة الطلبة الناجحين في مادة الشبكات هي ٧٥٪ فهي أكثر دلالة لأنها في نفس الوقت تعطي فكرة عن عدد الذين لم يجتازوا الاختبار. وأول خطوة لتمثيل مكونات منظومة القوى بنظام الوحدة هي تحديد أوتعريف القيم النسبية.

٤ -٤ -١. تعريف القيم النسبية

في الكثير من النظم يكون تحديد القيم الإسنادية مباشرا ففي مثال نتيجة الاختبار تم أخذ عدد الطلاب الذين أدوا الاختبار كقيمة إسنادية وإذا أردنا أن نحدد معدل النمو السكاني في المملكة أخذنا عدد السكان كقيمة إسنادية. والأمر في منظومة القوى يختلف بعض الشيء وذلك لأن:

- يلزم تحديد قيم اسنادية لأكثر من كمية كهربية وهي القدرة والجهد والتيار والمعاوقة
- هذه الكميات ليست مستقلة عن بعضها ولكن تربطها ببعضها البعض علاقات يجب أن تؤخذ في الاعتبار عند تحديد القيم الإسنادية

و لتحديد القيم الإسنادية للكميات الكهربية الأربعة (القدرة والجهد والتيار و المعاوقة) لا يمكن تحديد قيمة إسنادية لكل كمية بطريقة منفصلة عن الآخرين، ولكن يتم تحديد قيم إسنادية لاثنتين من هذه الكميات ثم حساب القيم الإسنادية للكميتين الأخريين من القيم المحددة. وعادة يتم تحديد القيمة الإسنادية للقدرة والجهد وحساب القيم الإسنادية للتيار والمقاومة.

ويتم تحديد القيم الإسنادية لمنظومة القوى كالآتي:

١. يتم اختيار قيمة إسنادية للقدرة في الأوجه الثلاثة (total three phase power) وسوف نرمز لها بالرمز (MVA_b) لأنها عادة تكون مقدرة بالميجا فولت أمبير (١ ميجا فولت أمبير = ١٠٠٠ كيلو فولت أمبير = ١٠٠٠٠٠٠ فولت أمبير)، وهذه القيمة تكون ثابتة لجميع أجزاء منظومة ولا تتأثر بوجود المحولات حيث إن المحولات لا تغير من قيمة القدرة. ويفضل اختيار قيمة إسنادية تتناسب مع مقننات عناصر منظومة القوى وإلا عادة ما تؤخذ MVA_b = ١٠٠ MVA، ويفضل أيضا وضع هذه القيمة في مستطيل أعلى مخطط منظومة القوى لتوضيحها.

٢. تحديد قيمة إسنادية لجهد الخط (line to line voltage) مقدرة بالكيلو فولت في أحد أجزاء المنظومة وسوف نرمز لها بالرمز (kV_b)، و الفواصل بين أجزاء المنظومة هي المحولات، ولذلك في حالة عدم وجود محولات تعتبر المنظومة جزءا وحدا، أما كل محول يضيف جزءا آخر للمنظومة، فالمنظومة التي تحتوي على محول واحد تنقسم إلى جزأين والتي تحتوي على محولين تنقسم إلى ثلاثة أجزاء والتي بها ١١ محول تنقسم إلى ١٢ جزءاً، مع مراعاة أن المحولات المتصلة على التوازي تعد كأنها محول واحد. وبمجرد تحديد القيمة الإسنادية للجهد في أحد أجزاء المنظومة لا يكون لنا الخيار في تحديد القيم الإسنادية للجهد في باقي الأجزاء حيث إنه يتم حسابها من القيمة المحددة ونسب تحويل المحولات، حيث إنه يجب أن تكون القيم الإسنادية للجهد في جميع أجزاء المنظومة متناسبة مع نسبة تحويل المحولات (نسبة جهد الخط في المنظومات ثلاثية الأوجه وبذلك لا يكون لكيفية توصيل جانبي المحول أي تأثير على الحسابات). ويفضل أن توضع القيمة الإسنادية للجهد في كل من أجزاء المنظومة داخل شكل بيضاوي للوضوح وسهولة الوصول إلى القيم الإسنادية عند الحاجة إليها.

٣. تحسب القيمة الإسنادية للتيار (**I_b**) مقدرة بالأمبير في كل من أجزاء المنظومة من القيمة الإسنادية للجهد في هذا الجزء والقيمة الإسنادية للقدرة. من العلاقة التالية:

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} \qquad (٤.١)$$

٤. يتم حساب القيمة الإسنادية للمعاوقة (**Z_b**) في أي من أجزاء المنظومة مقدرة بالأوم من العلاقة التالية:

$$Z_b = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} \qquad (٤.٢)$$

في كثير من الأحيان يكون لدينا المعاوقة مقدرة بالوحدة على أساس قيم إسنادية معينة ونحتاج إلى تقدير نفس المعاوقة بالوحدة على أساس من قيم إسنادية أخرى، كثيرا ما نواجه هذه الحالة مع

المولدات والمحركات والمحولات والتي تكون معاوقاتها مقدرة بالوحدة باستخدام القدرة المقننة للآلة والجهد المقنن لها كقيم إسنادية و في الغالب يحدث اختلاف بين هذه القيم والقيم الإسنادية المحددة للمنظومة. ولإجراء التعديل على أساس القيم الإسنادية الجديدة نحتاج لحساب المقاومة الحقيقية للآلة مقدرة بالأوم ثم نقسمها على القيمة الإسنادية الجديدة. ولكن هذه العمليات يمكن اختصارها باستخدام العلاقة الآتية:

$$Z_{new} = Z_{old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \qquad (٤,٣)$$

حيث Z_{old} هي قيمة المعاوقة مقدرة بالوحدة على أساس القيم الإسنادية القديمة

kV_{old} هي القيمة الإسنادية القديمة للجهد والتي عادة ما تكون هي الجهد المقنن للآلة

MVA_{old} هي القيمة الإسنادية القديمة للقدرة والتي عادة ما تكون هي القدرة المقننة للآلة

Z_{new} هي قيمة المعاوقة مقدرة بالوحدة على أساس القيم الإسنادية الجديدة

KV_{new} هي القيمة الإسنادية الجديدة للجهد

MVA_{new} هي القيمة الإسنادية الجديدة للقدرة

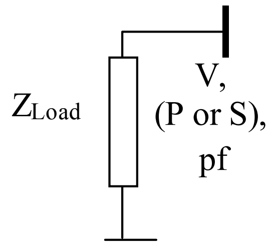
وقد تعمدت كتابة هذه المعادلة بهذا الخط الكبير نظرا لأهميتها القصوى، لأن تمثيل أي منظومة حقيقية بنظام الوحدة لا يمكن أن يتم بدون استعمال هذه المعادلة لتعديل قيم معاوقات الآلات على أساس من القيم الإسنادية للمنظومة بدلا من قيمتها المحسوبة على أساس مقنناتها. وقبل التعامل مع منظومة كاملة وتمثيلها سنوضح أولا كيفية تمثيل عناصر منظومة القوى المختلفة.

٤ -٤ -٢. تمثيل عناصر منظومة القوى

سبق أن أشرنا أنه لحساب تيار القصر في منظومة قوى نهمل جميع الأحمال الموجودة قبل حدوث الخطأ ونهمل كذلك المقاومات الموجودة و جميع أفرع التوازي يتم أيضا إهمالها ونفرض أن جهود جميع مصادر تغذية القصر متساوية وتساوي الوحدة. وفى ضوء هذه الفروض سوف نرى الآن كيف يتم تمثيل عناصر منظومة القوى.

تمثيل الأحمال

يمثل الحمل بمعاوقة كما هو موضح بشكل ٤ -٢. ويكفي لتحديد معاوقة الحمل معرفة القدرة التي يستهلكها هذا الحمل عندما يعمل عند جهد معين وكذلك معامل القدرة له. ويتم حساب معاوقة الحمل كالآتي:



شكل ٤ -٢ تمثيل الحمل

$$Z_L = \frac{V^2}{S} \angle \pm \cos^{-1}(pf) = \frac{V^2 . pf}{P} \angle \pm \cos^{-1}(pf) \quad \Omega$$

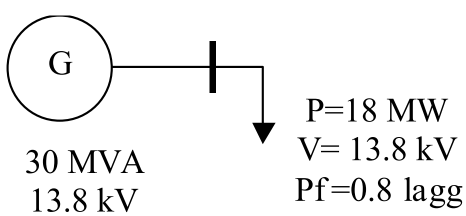
حيث (V) هو جهد الحمل بالفولت، S هي القدرة الظاهرية للحمل بالفولت أمبير، P هي القدرة الفعالة للحمل بالوات، pf معامل القدرة للحمل. وتؤخذ الإشارة الموجبة لزاوية المعاوقة إذا كان معامل القدرة متأخرا و تؤخذ الإشارة السالبة في حالة معامل القدرة المتقدم.

تمثيل المولد

كما وضحنا سابقا يتم تمثيل المولد كما في شكل ٤ -١ بمصدر جهد بالتوالي مع معاوقة تساوي مفاعلة الحالة دون العابرة، وكذلك المحركات والمكثفات التزامنية والمحركات الحثية. والآن سنورد مثالا على كيفية تمثيل كل من المولد والحمل بنظام الوحدة.

مثال ٤ -١

شكل ٤ -٣ يوضح مخطط منظومة قوى مبسطة مكونة من مولد وحمل بياناتهما كما هو موضح على الرسم فإذا كانت مقاومة المولد ٢أوم ومفاعلتة ١٠ أوم. ارسم مخطط المعاوقة لهذه المنظومة مع تقدير كافة المعاوقات بالوحدة معتبرا القيم الإسنادية للقدرة والجهد مساوية لمقننات المولد



شكل ٤ -٣

الحل

القيمة الإسنادية للقدرة وهي ثابتة للمولد والحمل

MVA_b = ٣٠ MVA

القيمة الإسنادية للجهد هي نفسها للمولد والحمل لأنهما غير مفصولين بمحول

kV_b = ١٣٫٨ kV.

معاوقة الحمل:

$$Z_L = \frac{V^2.pf}{P} \lfloor \pm \cos^{-1}(pf) = \frac{(13.8)^2 \times 0.8}{18} \lfloor \cos^{-1}(0.8)$$
$$= 8.464 \lfloor 36.87^\circ = 6.7712 + j5.0784 \ \Omega$$

القيمة الإسنادية للمعاوقة

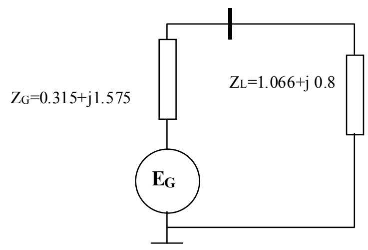
$$Z_b = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} = \frac{(13.8)^2}{30} = 6.348\,\Omega$$

وتكون قيم المعاوقات مقدرة بالوحدة مساوية لخارج قسمة المعاوقة مقدرة بالأوم على القيمة الإسنادية للمعاوقة، فتكون:

$$Z_G = \frac{2 + j10}{6.348} = 0.315 + j1.575 \ \ pu$$

$$Z_L = \frac{6.7712 + j5.0784}{6.348} = 1.0667 + j0.8 \ \ pu$$

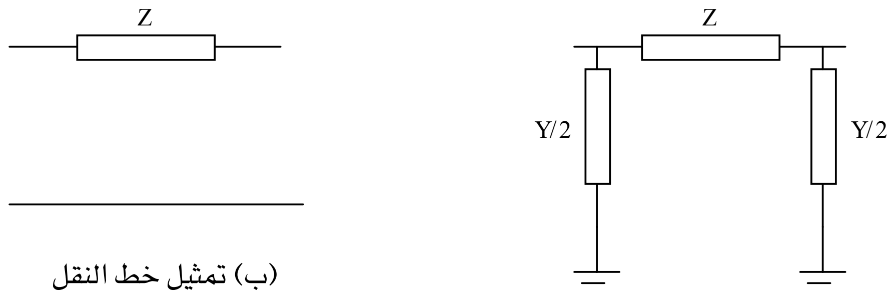
والرمز (pu) يعني وحدة.، ومخطط المعاوقة لهذه المنظومة موضح في شكل ٤ -٤.



شكل ٤ -٤

تمثيل الخطوط

لدراسة أداء المنظومة في الحالة المستقرة يتم تمثيل الخط بدائرة π المكافئة حيث تقسم سعة الخط إلى نصفين يوضع أحدهما في بداية الخط والآخر في نهايته (شكل ٤ -٥ -أ). وهذا التمثيل بالإضافة إلى أنه يقرب أداء الخط بدقة مقبولة فإنه لا يضيف نقاطا nodes جديدة إلى الدائرة منظومة القوى المكافئة لمنظومة القوى كما هو الحال في حالة تمثيله بدائرة T و بالتالي لا يزيد في أعباء الحسابات للمنظومة. وفي دراسة القصر تهمل سعة الخط ويمثل بمعاوقة على التوالي فقط (شكل ٤ -٥ – ب) وتقدر معاوقة الخط بالوحدة وذلك بقسمة المعاوقة مقدرة بالأوم على القيمة الإسنادية للمعاوقة في دائرة الخط.



(أ) تمثيل خط النقل بدائرة π

(ب) تمثيل خط النقل لدراسات القصر

شكل ٤ -٥ تمثيل خط النقل

تمثيل المحول

يتم تمثيل المحول بمعاوقة على التوالي – بإهمال دائرة التوازي الممثلة لتيار اللاحمل - كما في حالة خط النقل وتكون الدائرة المكافئة للمحول مماثلة تماما للدائرة المكافئة لخط النقل (شكل ٤ - ٥ -ب) وأيضا يتم تقدير المعاوقة بالوحدة وكما ذكرنا أن قيمة معاوقة المحول لا تعتمد على أي جانب تمت نسبتها مع مراعاة أنه يوجد قيمة إسنادية للجهد لكل جانب من جانبي المحول تختلف عن نظيرتها في الجانب الآخر، وسنوضح هذه المزية لنظام الوحدة بمثال.

مثال ٤ -٢

محول ١٣,٨ / ١,٣٨ ك ف قدرته المقننة ٣٠ م ف أ، وكانت معاوقة ملفات الجهد العالي $z_1 = ١,٢٥ + j\ ٢\ \Omega$ ومعاوقة ملفات الجهد المنخفض $z_2 = ٠,٠١٧٥ + j\ ٠,٠٢\ \Omega$. احسب المعاوقة الكلية للمحول مقدرة بالوحدة مرة بنسبة المعاوقات إلى ناحية الجهد العالي وثانية بنسبتها إلى الجهد المنخفض و ثالثة بدون نسبة أي ببقاء مقاومة كل جانب مكانها.

الحل

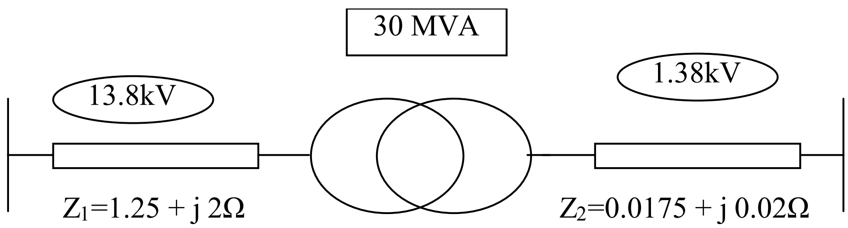
شكل ٤ -٦ يوضح مخطط المحول ومعاوقاته وعلى الرسم أيضا تم وضع القيم الإسنادية للقدرة و للجهود على جانبي المحول. وقد تم اختيار القيمة الإسنادية للقدرة مساوية للقدرة المقننة للمحول طالما أنه ليس هناك عناصر أخرى فهي أنسب قيمة. أي أن $MVA_b = ٣٠\ MVA$

القيمة الإسنادية للجهد في جانب الجهد العالي أخذت مساوية لجهد المحول أيضا. $KV_{b1} = ١٣,٨\ kV$

أما القيمة الإسنادية للجهد في جانب الجهد المنخفض فتم حسابها باستخدام نسبة جهود المحول كالآتي:

$$kV_{b2} = kV_{b1} \times \frac{V_2}{V_1} = 13.8 \times \frac{1.38}{13.8} = 1.38\ kV$$

والقيمة الإسنادية للقدرة موضوعة داخل مستطيل وهي ثابتة لجانبي المحول، في حين أن القيم الإسنادية للجهد لكل جانب موضوعة داخل شكل بيضاوي كل في الجانب الخاص بها.



شكل ٤ -٦

والآن لنحسب القيم الإسنادية للمعاوقة على جانبي المحول

بالنسبة لجانب الجهد العالي:

$$Z_{b1} = \frac{(kV_{b1})^2}{MVA_b} = \frac{(13.8)^2}{30} = 6.348\,\Omega$$

وبالنسبة لجانب الجهد المنخفض:

$$Z_{b2} = \frac{(kV_{b2})^2}{MVA_b} = \frac{(1.38)^2}{30} = 0.06348\,\Omega$$

أولا: نسبة المعاوقات إلى جانب الجهد العالي

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2' = Z_1 + Z_2 \times \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$

$$= 1.25 + j2 + (0.0175 + j0.02)\left(\frac{13.8}{1.38}\right)^2 = 1.25 + j2 + 1.75 + j2 = 3 + j4\,\Omega$$

وتكون معاوقة المحول مقدرة بالوحدة (Z_{pu}):

$$Z_{pu} = \frac{Z_{eq}}{Z_{b1}} = \frac{3 + j4}{6.348} = 0.4726 + j0.63 \text{ pu}$$

ثانيا: نسبة المعاوقات إلى جانب الجهد المنخفض

$$Z_{eq} = Z_2 + Z_1' = Z_2 + Z_1 \times \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2$$

$$= 0.0175 + j0.02 + (1.25 + j2)\left(\frac{1.38}{13.8}\right)^2 = 0.0175 + j0.02 + 1.25 + j2 + = 0.03 + j0.04\,\Omega$$

وتكون معاوقة المحول مقدرة بالوحدة (Z_{pu}):

$$Z_{pu} = \frac{Z_{eq}}{Z_{b2}} = \frac{0.03 + j0.04}{0.06348} = 0.4726 + j\,0.63 \text{ pu}$$

وواضح أنها نفس القيمة التي حصلنا عليها في أولا. والآن سنقوم بحساب معاوقة كل جانب بالوحدة ثم نوجد المعاوقة المكافئة للمحول مقدرة بالوحدة

ثالثا : بدون نسبة المعاوقات

نحسب معاوقة الجهد العالي بالوحدة

$$Z_{1pu} = \frac{Z_1}{Z_{b1}} = \frac{1.25 + j2}{6.348} = 0.1969 + j\,0.315 \text{ pu}$$

نحسب معاوقة الجهد المنخفض بالوحدة

$$Z_{2pu} = \frac{Z_2}{Z_{b2}} = \frac{0.0175 + j0.02}{0.06348} = 0.2757 + j\,0.315 \text{ pu}$$

وتكون المعاوقة الكلية للمحول مقدرة بالوحدة :

$$Z_{pu} = Z_{1pu} + Z_{2pu} = 0.1969 + j\,0.315 \text{ pu} + (0.2757 + j\,0.315)$$
$$= 0.4726 + 0.63 \text{ pu}$$

وهي نفس القيمة التي حصلنا عليها في الحالتين السابقتين. ولعله من الواضح الآن أن تقدير المعاوقات بالوحدة لا يتأثر بوجود المحولات.

٤_٥ أنواع القصر الكهربائي

أنواع دوائر القصر التي يمكن أن تحدث في منظومة القوى هي:

أ. القصر المتماثل ثلاثي الأوجه symmetrical three phase fault

وفيه تكون الأوجه الثلاثة مقصورة معا كما في شكل ٤ -٧ -أ ، ولذلك تكون التيارات في الأوجه الثلاثة متماثلة، ويستوي في هذه الحالة اتصال الأوجه الثلاثة بالأرض وعدم اتصالهم بها. وهذا النوع هو الأقل حدوثا ولكنه أشد دوائر القصر خطرا على منظومة القوى حيث يكون تيار القصر أكبر منه في باقي حالات القصر ولذلك يتم استخدام تيار القصر في هذه الحالة لتحديد مقننات القواطع.

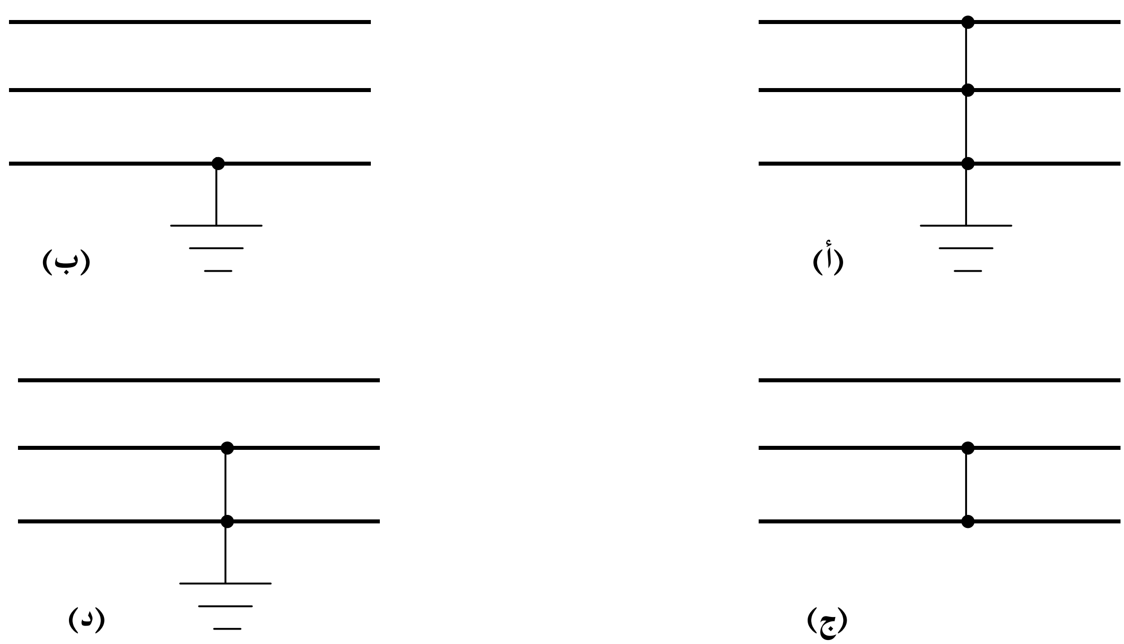
ب. القصر خط – أرض single line to ground fault

وفي هذا النوع يحدث اتصال بين وجه والأرض كما في شكل ٤ -٧ -ب وهو الأكثر حدوثا في منظومات القوى وأكثر ما يحدث في خطوط النقل، والتيار الناتج عن هذا القصر يكون هو الأقل في

معظم الحالات، يكون التيار في الوجه الذي حدث عليه القصر كبيراً في حين يكون التيار في الوجهين الآخرين صفراً ولذلك تكون المنظومة في حالة عدم اتزان unbalance كبير في الجهد وفي التيار.

ج. القصر خط – خط line to line fault

و هذا النوع موضح في شكل ٤ -٧ -ج حيث يحدث اتصال بين خطين بعيدا عن الأرض وهو أيضا خطأ غير متماثل لأن الأوجه الثلاثة ليست معرضه لنفس الظروف، فهنا نجد أن خطين اتصلا فأصبح جهد كل منهما مساوياً لجهد الآخر و التيار في أحدهما مساو ومعاكس للتيار في الآخر في حين أن الخط السليم تياره صفر وجهده مختلف عن الآخرين .



شكل (٤ -٧) أنواع دوائر القصر على منظومة القوى

د. القصر خطين – أرض double line to ground fault

وكما هو موضح في شكل ٤ -٧ -د اتصال بين خطين مع الأرض وهو أيضا خطأ غير متماثل لنفس السبب وهو أن الأوجه الثلاثة ليست معرضة لنفس الظروف، وهنا فإن جهد الخطين المتصلين بالأرض يصبح صفرا ويكون تيار القصر المار إلى الأرض هو مجموع تياري القصر في كل من الخطين.

وكما أوضحنا أنه فيما عدا الخطأ ثلاثي الأوجه فجميع الأخطاء الباقية غير متماثلة و عدم التماثل ليس نتيجة لعدم تماثل التيارات والجهود فحسب ولكن لعدم تماثل الأوجه الثلاثة للشبكة نفسها، وبالتالي لا يمكن تحليل هذه الأخطاء بإجراء الحسابات لوجه واحد كما نفعل في حسابات الأداء في الظروف العادية أو لحساب تيار القصر في حالة الخطأ المتماثل، بل يلزم هنا إيجاد دوائر التتابع الموجب والسالب والصفري للشبكة وتوصيلها معا بطريقة تعتمد على نوع الخطأ للحصول على المركبات المتماثلة لتيار القصر. وفي هذا المقرر سنكتفي بحساب تيار القصر المتماثل ثلاثي الأوجه فقط ولن نتعرض لحساب تيار القصر غير المتماثل.

٤_٦ حساب تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه

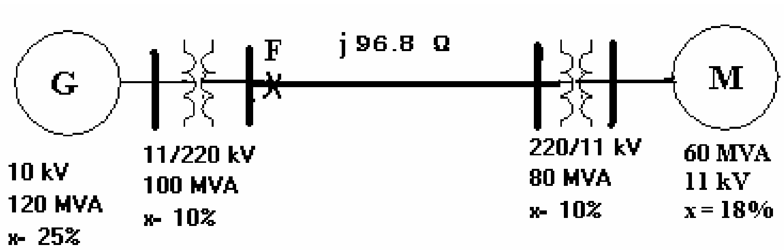
لحساب تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه عند نقطة معينة في منظومة القوى يكفي تمثيل وجه واحد فقط وإجراء الحسابات له وما يحدث في هذا الوجه هو نفسه ما يحدث في الوجهين الآخرين ولكن مع إزاحة في زاوية الطور مقدارها ١٢٠ درجة بين كل وجه والآخر. وإذا بدأنا بمخطط الخط الواحد لمنظومة القوى فإن خطوات حساب تيار القصر تتمثل في الآتي:

١. تحديد قيمة إسنادية للقدرة للمنظومة وقيمة إسنادية في أحد أجزاء المنظومة وحساب القيم الإسنادية للجهد في باقي أجزاء المنظومة باستخدام نسب تحويل المحولات، ومن ثم تقدير قيم معاوقات عناصر المنظومة بالوحدة على أساس هذه القيم الإسنادية.
٢. نرسم مخطط المعاوقة للمنظومة في حالة حدوث الخطأ، ولتنفيذ ذلك بسهولة، نرسم خطا أفقيا يمثل الأرض (G) وخطا آخر موازٍ له ويبعد عنه مسافة كافية يمثل النقطة التي حدث عندها الخطأ (F).
٣. نبدأ بتوصيل الدائرة المكافئة لمصدر من مصادر تغذية الخطأ بخط الأرض ثم الدوائر المكافئة للعناصر المتصلة بهذا المصدر وتشكل مسارا متصلا حتى نقطة الخطأ ونكرر هذا لجميع المسارات الممكنة لتغذية الخطأ عن طريق هذا المصدر.
٤. نكرر الخطوة ٣ لجميع مصادر تغذية تيار القصر وبعد الانتهاء نبدأ في اختصار الدائرة الكهربية الناتجة، حيث نبدأ بتوصيل القوى الدافعة لجميع المصادر على التوازي والاستعاضة عنهم بقوة دافعة كهربية وحيدة تساوي الوحدة، ثم نبدأ في اختصار المعاوقات إلى معاوقة واحدة.
٥. بعد اختصار المعاوقات تصبح الدائرة عبارة عن مصدر جهد واحد بالتوالي مع معاوقة واحدة – تعرف هذه الدائرة بدائرة التتابع الموجب - فيكون تيار الخطأ عبارة عن خارج قسمة جهد المصدر على قيمة المعاوقة.

ولنرى كيف يتم ذلك بمثال على منظومة قوى.

مثال ٤ -٣:

لمنظومة القوى الموضحة بالشكل التالي احسب تيار القصر إذا حدث خطأ متماثل ثلاثي الأوجه عند النقطة F في بداية خط النقل من ناحية المولد بفرض أن القوة الدافعة الكهربية لكل من المولد والمحرك قبل حدوث الخطأ كانت مساوية kV١٠، بيانات جميع مكونات المنظومة موجودة على الرسم. اعتبر القيمة الإسنادية في دائرة المولد هي MVA١٠٠ للقدرة، kV١٠ للجهد. احسب توزيع تيار القصر في كل جزء من أجزاء المنظومة مقدرا بالوحدة وبالأمبير.



شكل ٤ -٨

الحل

نظرا للاختلاف في مقننات مكونات منظومة القوي فإنه سيلزم تعديل قيم المعاوقات على أساس القيم الإسنادية المحددة.

القيمة الإسنادية للقدرة هي MVA_b= ١٠٠ MVA وقد أعدنا رسم مخطط المنظومة ووضع القيمة الإسنادية في مستطيل أعلى مخطط المنظومة وهذه هي القيمة الإسنادية للقدرة لكل أجزاء المنظومة وليس لدائرة المولد فقط.

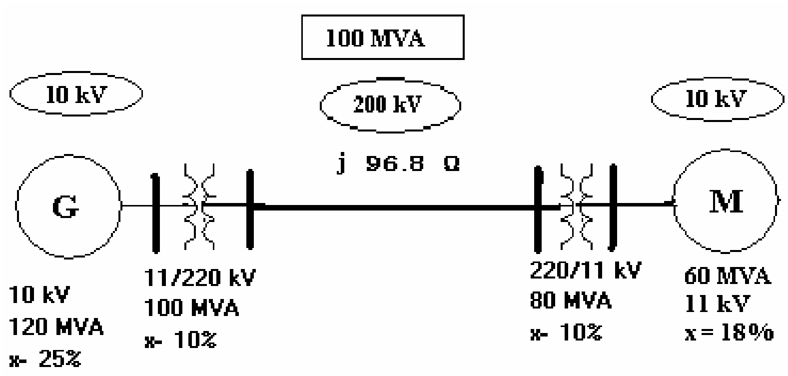
القيمة الإسنادية للجهد في دائرة خط النقل = القيمة الإسنادية للجهد في دائرة المولد × نسبة تحويل المحول الأول

kV_b في دائرة خط النقل $\left(=10\times\frac{220}{11}=200kV\right)$

القيمة الإسنادية للجهد في دائرة المحرك = القيمة الإسنادية للجهد في دائرة خط النقل × نسبة تحويل المحول الثاني

kV_b في دائرة المحرك $\left(=200\times\frac{11}{220}=10kV\right)$

وهذه القيم موضحة على مخطط المنظومة داخل شكل بيضاوي أعلى كل جزء من أجزاء.



وبالنظر إلى الشكل ومقارنة القيم الإسنادية بمقننات أجزاء المنظومة نجد اختلافا مما يستوجب تعديل قيم معاوقات عناصر المنظومة طبقا للقيم الإسنادية الجديدة.

معاوقة المولد:

$$Z_{G\,new} = Z_{G\,old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \quad = j\,0.25 \times \frac{100}{120} \times (\frac{10}{10})^2$$

$$\therefore Z_G = j\,0.2083\,\text{pu}$$

معاوقة المحول الأول:

للمحول جانبين لكل منهما جهده المقنن ويقع كل منهما في دائرة لها قيمة إسنادية للجهد تختلف عن الأخري، فيجب مراعاة أنك إذا اعتبرت kV_{old} هي الجهد المنخفض للمحول كان لزاما أن تعتبر القيمة الإسنادية ناحية الجهد المنخفض على أنها kV_{new} وإلا حدث خطأ كبير في الحساب، لهذا المحول سنعمل ناحية الجهد المنخفض وللمحول الثاني سنعمل ناحية الجهد العالي للتوضيح فقط مع التأكيد على أن لك مطلق الحرية في اختيار أي من جانبي المحول .

$$Z_{T1new} = Z_{T1old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \quad = j\,0.1 \times \frac{100}{100} \times (\frac{11}{10})^2$$

$$\therefore Z_{T1} = j\,0.121\,\text{pu}$$

خط النقل:

حيث إن معاوقة خط النقل معطاة بالأوم سيلزم حساب القيمة الإسنادية للمعاوقة في دائرة خط النقل أولا

$$Z_b = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} \quad = \frac{(200)^2}{100} = 400\ \Omega$$

وتكون معاوقة خط النقل مقدرة بالوحدة

$$Z_{TL\,pu} = \frac{Z_{TL\,\Omega}}{Z_b} = \frac{j96.8}{400} = j\,0.242\,\text{pu}$$

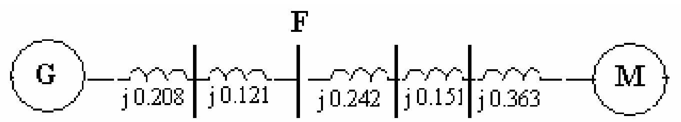
بالنسبة للمحول الثاني:

$$Z_{new} = Z_{old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \quad = j\,0.1 \times \frac{100}{80} \times (\frac{220}{200})^2 = j\,0.1513\,\text{pu}$$

معاوقة المحرك

$$Z_{new} = Z_{old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \quad = j\,0.18 \times \frac{100}{60} \times (\frac{11}{10})^2 = j\,0.363\,\text{pu}$$

والشكل التالي يوضح مخطط المعاوقة للمنظومة بعد تعديل قيم المعاوقات على أساس القيم الإسنادية الجديدة

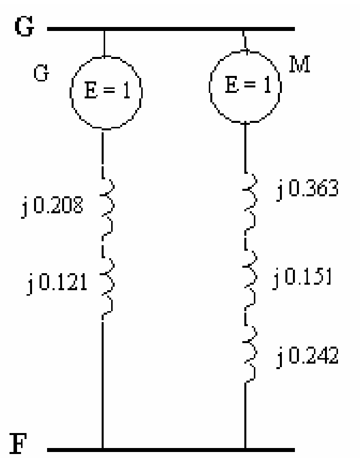


ورغم أن هذه المنظومة بسيطة ويمكن إيجاد تيار الخطأ بطريقة مباشرة بقسمة القوة الدافعة للمولد على المعاوقة بينه وبين نقطة الخطأ وكذلك بالنسبة للمحرك ولكن سوف نجري الخطوات المتبعة بصفة عامة سواء كانت المنظومة بسيطة أم لا لتوضيح هذه الخطوات.

ولحساب تيار القصر عند النقطة F:

قيمة الجهد المحددة لكل من المولد والمحرك هي ١٠kV ويجب تحويلها إلى قيمة بالوحدة لأن جميع الكميات الكهربية يجب أن تكون مقدرة بالوحدة

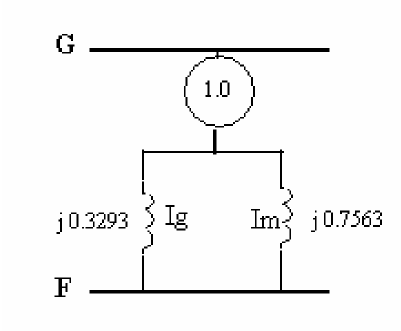
$$E_{G\,pu} = \frac{E_{G\,kv}}{kV_b} = \frac{10}{10} = 1pu, \qquad E_{M\,pu} = \frac{E_{M\,kv}}{kV_b} = \frac{10}{10} = 1pu$$



نرسم الدائرة المكافئة لمنظومة القوى في حالة حدوث الخطأ

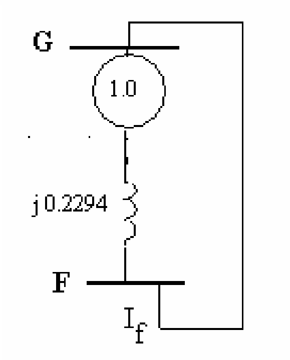
- كما هو موضح بالرسم المقابل، رسمنا خطا يمثل الأرض G وآخر يمثل نقطة الخطأ F

- مصادر تغذية الخطأ هي المولد والمحرك، ولذلك بدأنا بالمولد ورسمنا مسارات تغذية الخطأ منه (في هذه الحالة مسار واحد فقط الذي يضم المولد والمحول الأول) وفعلنا نفس الشيء للمحرك وله أيضا مسار واحد يشمل المحرك والمحول الثاني وخط النقل



نبسط هذه الدائرة المكافئة و أولى خطوات التبسيط هو الاستعاضة عن جميع مصادر الجهد في الدائرة بمصدر وحيد كما هو موضح بالرسم المقابل، وكذلك نوجد المقاومة المكافئة لكل فرع من أفرع الدائرة، ونصل إلى معاوقتين على التوازي تكون المعاوقة المكافئة لهما:

$$Z_{eq} = \frac{j0.3293 \times j0.7563}{j0.3293 + j0.7563} = j0.2294\,pu$$



وبهذا نكون حصلنا على دائرة التتابع الموجب لمنظومة القوي لخطأ عند F في أبسط صورها أي مصدر جهد مع معاوقة على التوالي وقد اصطلح على تسمية المعاوقة المكافئة لدائرة التتابع الموجب X_1، وذلك لأن المقاومة مهملة وحيث إن الخطأ حصل عند F تكون المقاومة بينها وبين الأرض مساوية للصفر ولذلك نكمل الدائرة بتوصيل نقطة الخطأ بالأرض

حساب تيار القصر الكلى (I_f)

من دائرة التتابع الموجب التى حصلنا عليها يكون:

$$I_f = \frac{E}{X_1} = \frac{1.0}{0.2294} = 4.359 \text{ pu}$$

و لأن الخطأ حدث في دائرة خط النقل، فإن القيمة الحقيقية لتيار القصر تساوي حاصل ضرب قيمة تيار القصر بالوحدة و القيمة الإسنادية للتيار في دائرة خط النقل.

ولذلك نحسب القيمة الإسنادية للتيار في دائرة خط النقل

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200} = 288.675 \text{ A}$$

القيمة الحقيقية لتيار القصر

$$I_f = I_{f\,pu} \times I_b = 4.359 \times 288.675$$

$$I_f = 1258.33 \text{ A}$$

ولإيجاد تيار القصر في كل من المولد والمحرك نستخدم قانون تجزيء التيار بين معاوقتين على التوازي.

تيار المولد:

$$I_g = 4.359\,\frac{j\,0.7563}{j\,0.7563 + j\,0.3293} = 3.037 \text{ pu}$$

القيمة الإسنادية للتيار في دائرة المولد

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10} = 5773.5 \text{ A}$$

القيمة الحقيقية لتيار القصر في المولد

$$I_g = I_{g_{pu}} \times I_b = 3.037 \times 5773.5$$

$$I_g = 17534 \text{ A}$$

تيار المحرك:

$$I_m = 4.359\,\frac{j\,0.3293}{j\,0.7563 + j\,0.3293} = 1.322 \text{ pu}$$

القيمة الإسنادية للتيار في دائرة المحرك

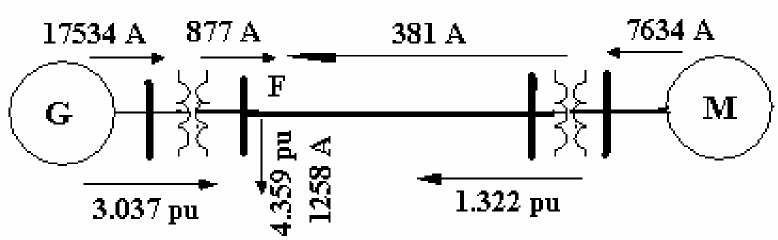
$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10} = 5773.5 \text{ A}$$

القيمة الحقيقية لتيار القصر في المحرك

$$I_m = I_{m\,pu} \times I_b = 1.322 \times 5773.5$$

$$I_m = 7634 \text{ A}$$

والشكل التالي يبين مخطط المنظومة موقعا عليه توزيع تيارات القصر في أجزاء المنظومة وقيم التيارات مقدرة بكل من الوحدة والأمبير



شكل ٤ -١٠

٤_٧ حساب مقنن القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه

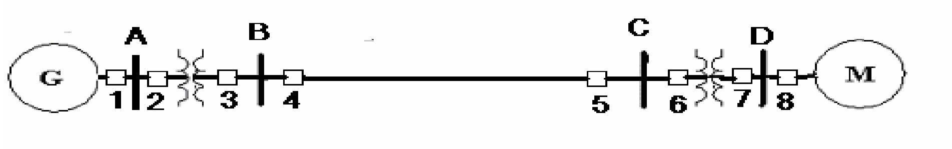
يتم حساب مقننات القصر لتحديد سعات القطع المطلوبة للقواطع التي ستقوم بحماية منظومة القوى ضد أخطار القصر، ولأن تيار القصر يكون أكبر ما يمكن في حالة الخطأ المتماثل ثلاثي الأوجه فإنه يتم حساب سعة القصر على أساس تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه. ولأن القواطع تكون متصلة على القضبان العمومية للمحطات التي تحتوي هذه القواطع فإن سعة القاطع تحسب على أساس مقنن القصر لخطأ ثلاثي الأوجه على القضبان العمومية المتصل عليها القاطع. ويتم حساب مقنن القصر من المعادلة الآتية:

$$MVA_{sc} = \sqrt{3}.kV_r \times I_{sc} \times 10^{-3}$$

حيث kV_r هو الجهد المقنن للقضبان العمومية المتصل عليها القاطع مقدرا بالكيلو فولت

I_{sc} هو تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه على نفس القضبان العمومية مقدرا بالأمبير

MVA_{sc} هي مقنن القصر عند القضبان



شكل ٤ -١١

ففي الشكل ٤ -١١ -يمثل نفس النظام الموجود في شكل ٤ -١٠ مع تحديد القواطع - لحساب مقنن القصر للقواطع ١، ٢ نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية A وكذلك للقواطع ٣، ٤ نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية B وللقواطع ٥،٦ نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية C وللقواطع ٧،٨ نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية D.

مثال ٤ -٤

احسب مقنن القصر للقواطع ٣، ٤ في شكل ٤ -١١. استخدم نتائج حسابات تيار القصر في المثال السابق.

الحل

بمقارنة بسيطة للشكلين ٤ -١١، ٤ -١٠ نستنتج أن نقطة F في شكل ٤ -١٠ يمكن اعتبارها هي نفسها القضبان العمومية B وذلك لأننا فرضنا أن الخط وقع في بداية خط النقل من ناحية المولد وبداية خط النقل هي نفسها القضبان العمومية المتصل بها خط النقل ألا وهي B أي أن قيمة تيار القصر عند القضبان B هي نفسها قيمة تيار القصر عند النقطة F في المثال السابق.

ويكون لدينا :

$$I_{sc} = ١٢٥٨\ A$$

$kV_r = ٢٢٠\ kV$ يساوي الجهد المقنن للمحول المتصل بهذه القضبان

وتكون سعة القصر:

$$MVA_{sc} = \sqrt{3}.kV_r \times I_{sc} \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times 220 \times 1258 \times 10^{-3}$$
$$\therefore MVA_{sc} = 479.36\ \text{MVA}$$

وبالطبع لن تجد قاطعاً له سعة قطع تساوي القيمة المحسوبة بالضبط وذلك لأنه يتم تصنيع هذه القواطع بسعات قياسية وقد يكون أقرب سعة قياسية لمقنن القصر الذي تم حسابه هو ٥٠٠MVA ولذلك عند اختيار سعة القاطع نأخذ هذه القيمة القياسية وليست المحسوبة.

٤ -٨ تأثير القصر وزمن الفصل على الشبكة

لكي نتصور مدى تأثير تيار القصر على الشبكة هناك عدة نقاط بسيطة يجب أن نستحضرها :

١. تيار القصر أكبر من تيار التشغيل العادي والذي تم تصميم و تركيب عناصر الشبكة على تحمله بعشرات المرات

٢. الطاقة الحرارية الناتجة عن التيار الكهربي تتناسب مع حاصل ضرب مربع القيمة الفعالة لشدة التيار والزمن

٣. القوة الكهرومغناطيسية الناتجة بين موصلات تحمل تيار تتناسب مع حاصل ضرب قيم التيارات في الموصلات.

ومن هذه النقاط الثلاثة يمكن تحديد تأثير تيار القصر في الآتي:

- التسخين الزائد لعناصر منظومات القوى التي يمر بها تيار القصر كالمحولات والمولدات والكابلات والخطوط والذي يصل إلى مئات المرات مقدار التسخين الناتج في حالات التشغيل العادي والذي يؤدي حتما إلى تدمير عوازل الكابلات والمحولات والمولدات وإلى انصهار الموصلات نفسها إذا استمر القصر لزمن طويل.
- القوى الكهرومغناطيسية بين الموصلات تكون أضعافا كثيرة للقيمة التي تم تصميم هذه الموصلات لتحملها وخصوصا القضبان العمومية وأدوات تثبيتها تكون أكبر تأثرا بهذه القوى.

بالإضافة إلى هذه التأثيرات يحدث شيء آخر ويكون خطيرا جدا إذا تأخر زمن الفصل، فمن المعلوم أنه أثناء القصر تنخفض الجهود في الشبكة بدرجة كبيرة مما يؤدي إلى أن تكون القدرة الكهربية المنقولة عبر الشبكة أقل بكثير من القدرة الميكانيكية الداخلة للمولدات. في مثل هذه الحالة تبدأ سرعة المولد

الواقع تحت تأثير القصر في التسارع نتيجة لأن القدرة الميكانيكية الداخلة له أكبر من الخارجة وشيئا فشيئا إن لم يتم فصل الخطأ قبل زمن يعرف بزمن الفصل الحرج يخرج المولد عن العمل بالتزامن مع المولدات الأخرى وتستمر سرعته في الزيادة بشكل كبير إلى أن يتم فصله بواسطة أجهزة الحماية ضد زيادة السرعة. وبعد خروج المولد الأول من الخدمة وفي حالة استمرار القصر تتداعى المولدات الباقية واحدا تلو الآخر حتى يحدث إظلام كامل ويلزم استعادة الشبكة من جديد.

٤ -٩ الممانعات الصناعية

كما شرحنا باختصار في الجزء السابق الآثار التدميرية للقصر إذا تأخر فصله، ورأينا أن هذه الآثار تحدث كنتيجة مباشرة لتيارات القصر الكبيرة جدا، وتكون تيارات القصر كبيرة نظرا لكون ممانعة الشبكة في حالة القصر تكون صغيرة، ولذلك يلزم أحيانا إضافة ممانعات صناعية للحد من تيارات القصر. وأشهر هذه الممانعات هي الممانعات التي تضاف بين نقطة التعادل للمولد والأرض وكذلك تلك التي تضاف إلى خطوط النقل إما بالتوازي أو بالتوالي.

٤ -٩ -١ ممانعات المولد

تضاف الممانعات بين نقطة التعادل والمولد للحد من تيار القصر وخصوصا تيارات القصر الأرضية. وذلك لأنه في حالة المولد تكون ممانعة التتابع الصفري أصغر من ممانعة التتابع الموجب ولذلك فإنه إذا حدث خطأ أرضي على أطراف المولد يكون تيار القصر أكبر منه في حالة القصر المتماثل ولذلك تضاف الممانعة للحد من هذا التيار، وهذه الممانعة لا تؤثر بحال في مقدار تيار القصر للخطأ المتماثل وإنما تقلل تيارات القصر للأخطاء المتصلة بالأرض. وهذه الممانعة قد تكون مفاعلة حثية أو مقاومة.

٤ -٩ -٢ ممانعات المغذيات

تضاف الممانعات للمغذيات بعدة طرق ولأسباب مختلفة. فتضاف مفاعلات سعوية على التوازي لتحسين الجهد وتعويض القدرة غير الفعالة، وقد تضاف نفس المفاعلات السعوية على التوالي لتعويض ممانعة المغذي وتحسين أدائه ولزيادة قدرة الشبكة على نقل القدرة (زيادة حدود الاستقرار لمنظومة القوي). وقد تضاف مقاومات أو مفاعلات حثية للتأريض بهدف الحد من تيار القصر.وكذلك يمكن استخدام تجميعات من المكثفات والملفات بغرض تعويض الحمل load compensation والهدف منه جعل الأحمال على الأوجه الثلاثة متزنة، أو ملف مع مكثف مع نظام للتحكم في سريان القدرة عبر الخطوط والمغذيات في الشبكة. فيما يعرف بأنظمة النقل المرنة للتيار المتغير flexible ac transmition systems FACTS.

أولا: المراجع العربية

[١] د/محمد علام "التحليل المتقدم لنظم القوى الكهربية"، دار الراتب الجامعية – بيروت – لبنان

[٢] د/آسر على زكي، د/أحمد حامي راشد، " نظم التوزيع وتنظيم الجهد"، منشأة المعارف، الإسكندرية، مصر

[٣] د/عبدالمنعم موسى، "كابلات القوى الكهربية"، دار الراتب الجامعية، بيروت

ثانيا: المراجع الأجنبية

[١] Turan Gönen, **Electric Power distribution system engineering**, McGraw-Hill Inc, ٢ed printing ١٩٨٩, ISBN ٠-٠٧-٠٢٣٧٠٧-٧

[٢] Anthony J. Pansini, **Electrical distribution engineering**, McGraw-Hill Inc, ٢ed printing ١٩٨٩, ISBN ٠-٠٧-٠٤٨٤٥٤-٦

[٣] Luces M. Faulkenberry, Walter Coffer, **Electric distribution and transmission**, Printice Hall, ISBN ٠-١٣-٢٤٩٩٤٧-٩

[٤] Charles A Gross, **Power system analysis**, John Willey & Sons, ١٩٨٦, ISBN ٠-٤٧١-٨٣٧٣٢-٦

الموضوع	الصفحة

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS